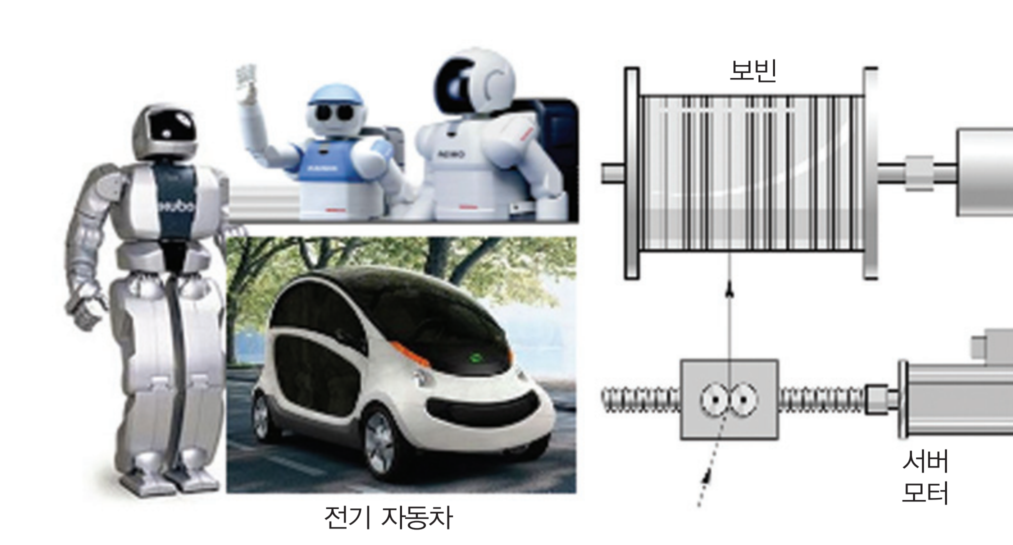
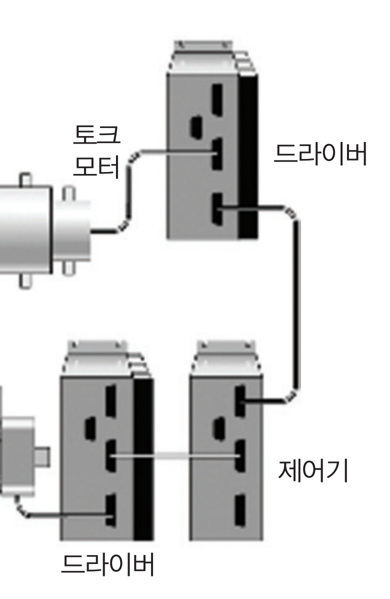
V

전동기 응용







최근에 전동기 산업은 산업의 다변화와 멀티미디어 기기, 로봇 등의 급성장으로 인하여 21세기 산업의 중추적 부품으로써 그 역할이 매우 높게 평가되고 있다. 또, 로봇 기술의 급격한 진보는 전동기 제어 기술을 널리 확산시키고 있다. 전동기 제어는 로봇 제어, 자동차 제어 외에도 공장 자동화 분야, 각종 첨단 공작 기계 제어, 권선기, 컨베이어 벨트, 송풍기, 펌프 제어뿐만 아니라, 엘리베이터, 에스컬레이터 제어 등의 빌딩 제어와 사무실 가전 제품에 이르기까지 그 응용 분야는 다량하다. 제어 방식도 아날로그에서 디지털 제어로, 단독 제어에서 네트워크 제어(Network control) 방식으로, 유선에서 무선으로 급변하고 있다.

이 단원에서는 이러한 변화 추세에 맞추어 산업 현장에서 실제로 널리 사용되는 전동기 응용에 대하여 알아보기로 한다.



전력용 반도체 소자



학습 목표 |

1. 전력용 반도체 소자의 종류와 용도, 특성에 대하여 설명할 수 있다.
2. 트랜지스터 반도체 소자를 사용하여 모터를 제어할 수 있다.

1 반도체 발전 동향과 소자의 종류

전력용 반도체의 발전 동향은 스위칭 속도의 고속화(high speed), 고전압 대전류 즉 고출력화(high power)와 쉬운 구동화(easy driver) 방향으로 급속히 발전되고 있다. 더욱 빠른 스위칭 속도는 무소음 인버터를 탄생시켰고, 고전압 대전류는 대용량 인버터를 만들 수 있게 되었다. 쉬운 구동으로 구동 회로를 포함한 제어 회로가 더욱 단순화되어 외형 크기를 크게 감소시키게 되어, 무소음 대용량이면서도 소형화가 가능하게 되었다.

그림 Ⅴ-1은 전력용 반도체 소자의 종류에 따른 사용 주파수 영역과 출력의 범위를 보여 주고 있다. 따라서, 사용할 출력과 주파수의 범위에 따라 어떤 반도체 종류를 선정하여야 하는지를 결정할 수 있다.

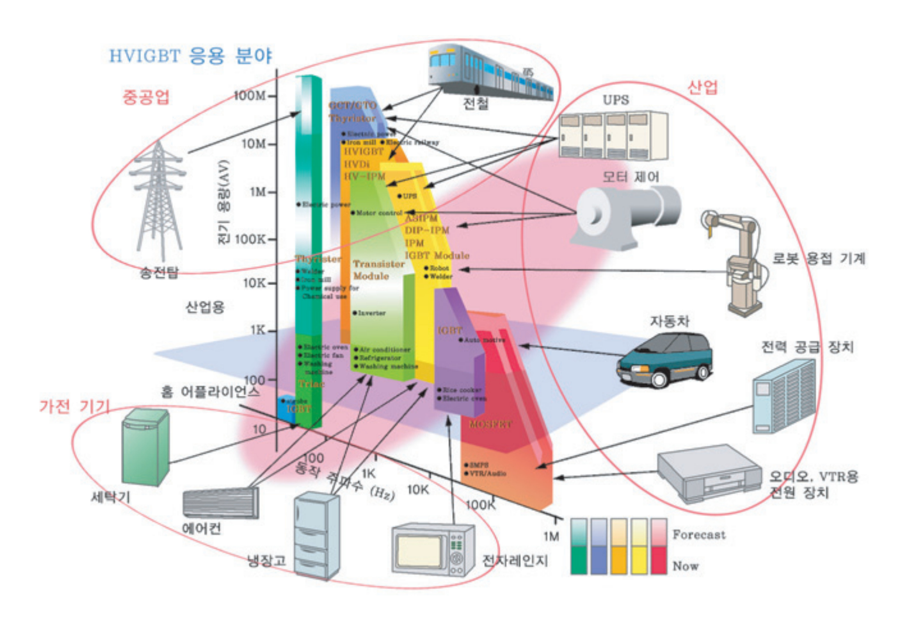


그림 Ⅴ-1 전력용 반도체 소자들의 사용 영역

표 Ⅴ-1 전력용 반도체의 종류와 특성

종류	그림 기호	정특성	기본 동작			비고
사이리스터			직류 / 교류		전류가 흐르지 않는 OFF 상태와 전류가 흐르는 ON 상태의 두 가지 안정 상태가 있으며, 또 ON 상태에서 OFF 상태로 그 반대로 OFF 상태로 이행하는 기능을 가진다. 양극에서 음극으로 전류가 흐른다.	직류 스위치(초퍼 제어: 전류 회로 필요) 위상 제어 교류 스위치
트라이액			교류		사이스리터 2개를 역병렬로 접속한 것과 등가. 양방향으로 전류가 흐르기 때문에 교류의 스위치로 사용된다.	위상 제어 교류 스위치
GTO			직류		게이트에 역방향으로 전류를 흘리면 자기 소호(OFF)하는 사이리스터	인버터 제어 초퍼 제어
트랜지스터 바이폴러			직류		베이스에 전류를 흘렸을때만 컬렉터 전류가 흐른다. 스위치용 파워디바이스는 Turn OFF를 빨리 하기 위해 OFF시에 역전압을 인가한다.	인버터 제어 초퍼 제어
MOS FET			직류		게이트에 전압을 인가했을 때만 드레인 전류가 흐른다. 고속 스위칭에 사용된다.	고속 인버터 제어 고속 초퍼 제어
IGBT			직류		게이트에 전압을 인가했을 때만 컬렉터 전류가 흐른다.	고속 인버터 제어 고속 초퍼 제어

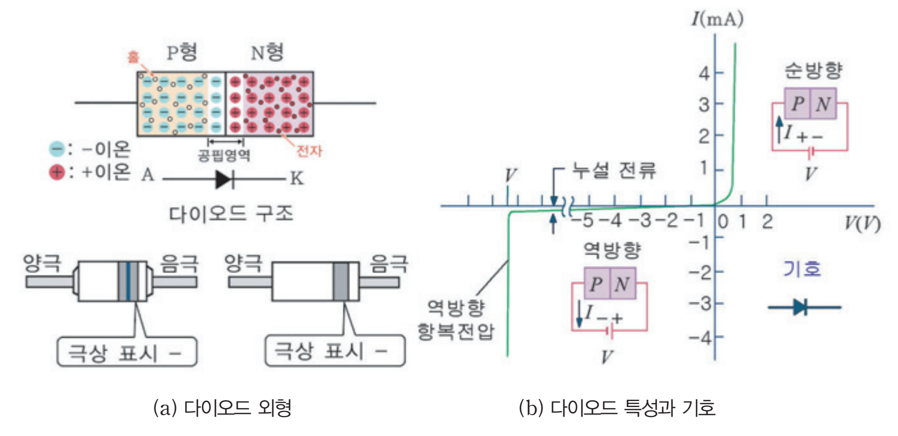
전력용 반도체 중에서 가장 단순한 스위칭 소자로 정류형 다이오드가 있으며, 이것은 순방향으로 전압을 인가하여 순방향 전압이 걸리면 턴 온(turn on)되어 전류가 흐르고, 역방향으로 인가하면 턴 오프(turn off)되어 전류가 차단된다. 즉, 다이오드는 제어가 불가능한 소자이다. 순방향 전압을 인가하여도 제어 신호를 주지 않으면 턴 온되지 않고, 한번 턴 온되면 계속 온 상태를 유지하는 래치형 소자로 사이리스터(SCR이라고도 하며, General Electric 사의 상품명에서 유래됨.)와 트라이액이 있다. 이 소자는 고속 동작은 어려우나 고전압 대전류 소자로 적합하다.

제어 전류가 인가되는 동안만 턴 온되고, 제어 신호를 제거하면 즉시 턴 오프되는 자기 소호형 소자로는 바이폴러 트랜지스터, MOSFET, GTO, IGBT 등이 있다. 이들 소자는 스위칭 속도가 빨라 고주파에서 응용이 가능하다. 표 Ⅴ-1는 여러 가지 전력용 반도체 소자들의 기호와 특성, 기본 동작, 응용 예를 요약한 것이다.

2 다이오드

그림 Ⅴ-2는 범용 다이오드의 구조, 외형, 동작, 특성을 나타낸 것이다. 다이오드는 종류별 특성과 용도가 다르다. 여기서는 가장 많이 사용되는 정류형 다이오드와 고속 역 회복 다이오드에 대하여 알아보자. 정류 다이오드는 교류를 직류로 변환시켜 주는 정류 회로에 많이 사용된다.

고속 역 회복 다이오드는 유도 부하에서 역기전력이나 노이즈를 흡수하는 회로나 노이즈 억제용으로 사용되고 있다. 표 Ⅴ-2는 다이오드의 종류와 응용 분야를 보다 상세히 보여 주고 있다.



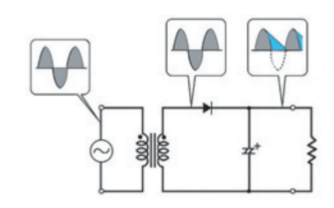
(a) 다이오드 외형 (b) 다이오드 특성과 기호

그림 Ⅴ-2 범용 다이오드의 구조, 외형, 동작, 특성

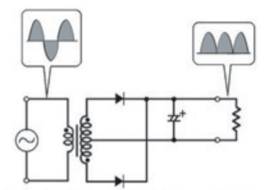
표 Ⅴ-2 다이오드의 종류와 응용 분야

품명	규격	회로 기호
정류 다이오드	교류를 직류로 변환할 때 응용	
스위칭 다이오드	고속 ON/OFF 특성을 스위칭에 응용	
정전압(제너) 다이오드	정전압 특성을 전압 안정화에 응용	
가변 용량(바렉터) 다이오드	가변 용량 특성을 FM 변조, AFC 동조에 응용	
터널(에사키) 다이오드	음저항 특성을 마이크로파 발진에 응용	
MES(쇼트키) 다이오드	고주파 저잡음 혼합기와 스위치 회로에 사용	
발광(LED) 다이오드	발광 특성을 응용하여 표시용 램프로 사용	
수광(포토) 다이오드	광검출 특성을 응용하여 광센서로 사용	
배리스터 다이오드	트랜지스터의 출력단의 온도 보상에 주로 사용	

그림 Ⅴ-3은 정류 회로의 종류와 동작 원리를 나타낸 것이다. 회로 (a)는 반파 정류 회로로 DC 출력의 리플이 크다. 그러나 회로 (b), (c)는 전파 정류 회로로 교류의 전 파형을 정류하여 리플이 적다. 회로 (b)는 변압기가 커지게 되며, 회로 (c)는 다이오드 수가 많아지는 단점은 있으나 출력 파형의 일그러짐이 적어 가장 많이 사용된다.



(a) 반파 정류



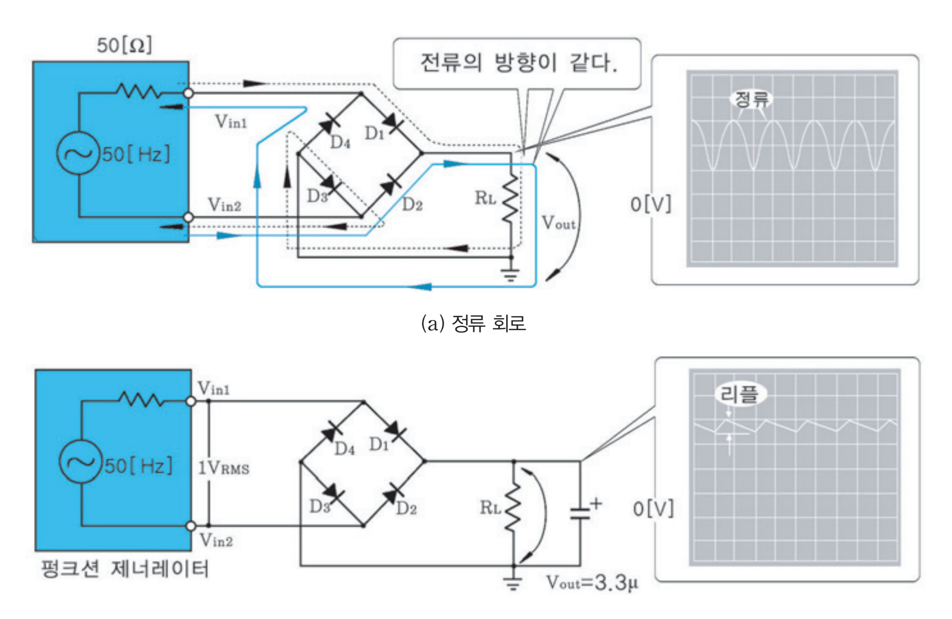


(b) 중성점이 있는 변압기를 이용한 전파 정류

(c) 브리지 다이오드를 사용한 전파 정류

그림 Ⅴ-3 정류 회로의 종류

그림 Ⅴ-4는 다이오드의 정류 동작을 이해할 수 있게 하기 위하여 전파 정류 브리지 회로와 동작 순서를 보여 주고 있다. 또, 평활 회로가 없을 때와 있을 때를 비교하여 그 파형을 관찰한 것이다.



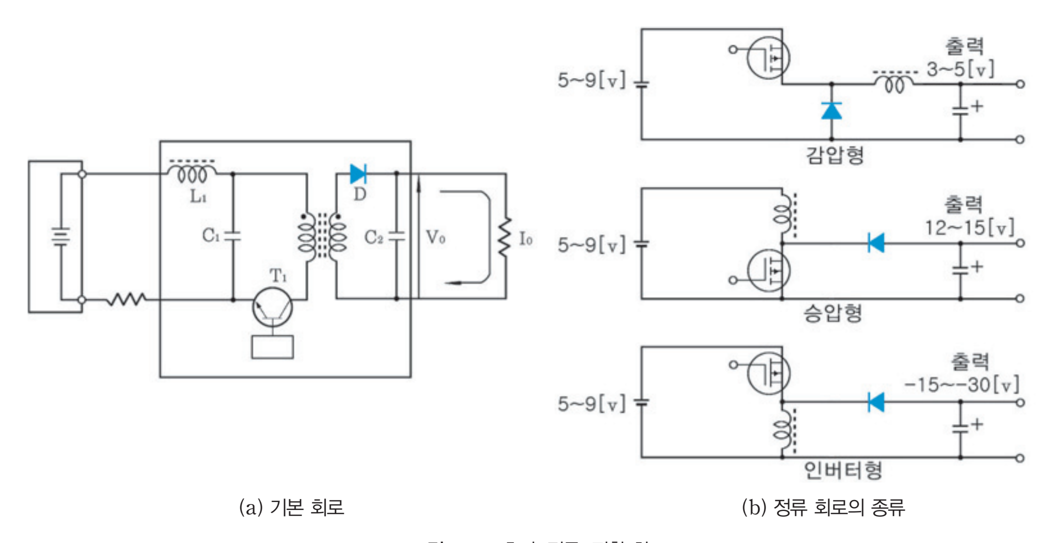
(a) 정류 회로

(b) 평활 콘덴서를 추가한 정류 회로

그림 Ⅴ-4 정류 회로와 평활 회로의 동작과 파형

그림 Ⅴ-4 (a)는 파형을 비교하여 볼 때 정류된 파형의 이론적인 파형과 실제 오실로스코프로 관측 결과 파형을 그림 Ⅴ-4 (b)에 비교하여 그 파형을 관찰한 것이다. 결국, 그림 Ⅴ-4 (b)는 평활 회로의 추가로 출력 파형의 리플이 크게 감소되는 것을 알 수 있다.

그림 Ⅴ-5는 전력용 MOSFET를 사용하여 초퍼(chopper) 회로를 만든 것이다. 이 초퍼 회로는 DC-DC 컨버터라고도 하며, 직류 전압을 전압의 크기가 다른 직류 전압으로 변환시켜 주는 회로이다. 이 초퍼 회로를 사용하여 DC-DC 컨버터를 구성할 경우 크기가 작아지는 장점이 있어, 제어 회로의 전원용으로 많이 사용되고 있다.



(a) 기본 회로

(b) 정류 회로의 종류

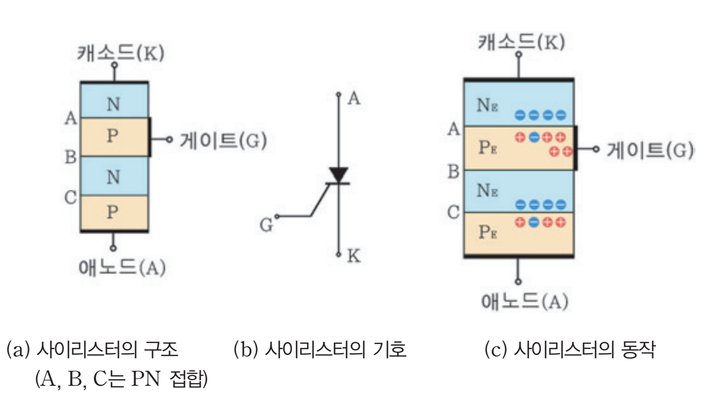
그림 Ⅴ-5 초퍼, 정류, 평활 회로

3 사이리스터

사이리스터(thyristor)는 SCR(sillicon controlled rectifier)이라고도 알려져 있다. 이것은 개발 회사인 미국의 제너럴일렉트릭(GE) 사의 상표명이다. 그림 Ⅴ-6은 사이리스터 구조, 기호, 동작, 외형을 보여 주고 있다.

사이리스터를 직류 회로로 동작시킬 경우에 애노드에 (+), 캐소드에 (−)의 전압을 인가하여 주고(순방향), 데이터 시트에 규정하고 있는 게이트 트리거 전류 I_{GT} 이상의 충분한 전류를 흘려 주면 ON 상태로 된다. 일단 ON 상태로 들어가면 게이트 전류를 제거하여도 ON 상태는 그대로 유지된다. 따라서, 게이트 전류는 펄스로 주는 것이 보통이다. 이때, ON 상태를 유지에 필요한 최소한의 애노드-캐소드 간의 전류를 유지 전류(holding current)라고 한다. 게이트 전류가 유지 전류 이하에서는 트랜지스터 동작과 같이 제어 신호를 인가시 켜지고, 제거하면 스스로 꺼진 상태로 돌아간다.

직류 회로에서 사이리스터를 꺼지게 하려면 부하 전류(사이리스터 애노드 전류)를 0으로 하든지, 애노드-캐소드 간에 역전압을 인가하든지의 두 가지 방법이 있다. 전자를 자연 전류(轉流)라고 하고, 후자를 강제 전류라고 한다.



(a) 사이리스터의 구조 (A, B, C는 PN 접합)　(b) 사이리스터의 기호　(c) 사이리스터의 동작



(d) 사이리스터의 외형

그림 Ⅴ-6 사이리스터 구조, 기호, 동작, 외형

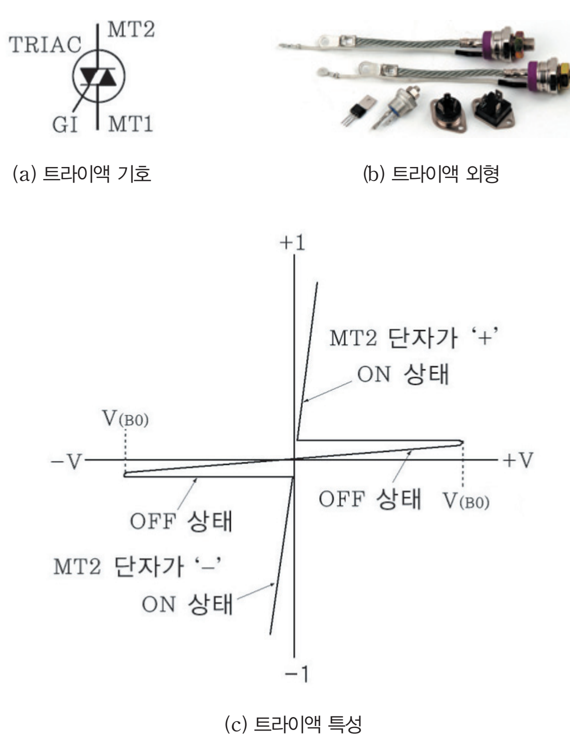
사이리스터를 교류 회로에 사용할 때에는 플러스 방향으로 전압이 인가되고 있을 때에 게이트 전류 펄스를 흘리는 것만으로도 켜지게 된다. 역방향으로 전압이 인가되고 있을 때에 게이트 전류를 흘려도 누설 전류가 약간 증가하는 것만으로 끝나고, 켜지지는 않는다. 교류의 위상에 맞추어 게이트 전류를 부여하면 위상에 비례한 전력의 제어를 할 수 있다. 이 원리를 이용한 제어를 위상 제어라고 하고, 교류 제어 회로에 널리 응용되고 있다.

4 트라이액

트라이액(TRIAC)은 교류용의 전력용 스위치로 교번 양파(交番兩波) 제어에 주로 사용된다. 그림 Ⅴ-7은 트라이액의 기호와 특성을 보여 주고 있다.

트라이액의 동작은 그림 Ⅴ-8과 같이 네 가지 모드로 나누어 설명할 수 있다. 트라이액에는 두 전극(MT1, MT2)과 게이트 전극(G)에 그림 Ⅴ-8의 (a)~(d) 경우와 같이 네 가지 전압 인가 방법에 따라 결정되는 게이트 트리거 모드가 있다.

게이트 극성을 바꾸는 그림 Ⅴ-8의 (a)와 (c)의 경우에는 다이액을 이용한 매우 간



(a) 트라이액 기호　(b) 트라이액 외형

(c) 트라이액 특성

그림 Ⅴ-7 트라이액의 기호와 특성

단한 회로에 응용되고, 주 전극 MT 1, MT 2 사이의 전압의 극성에 관계없이 일반적으로 마이너스 게이트 전류를 흘리는 그림 Ⅴ-8의 (b)와 (c) 동작 모드는 교류 전원을 외부 신호에 의하여 제어할 때에 적합한 동작 모드이다.

트라이액은 교류 회로의 위상제어나 ON/OFF 스위치로 SSR(solid state relay) 등이나 가전 제품의 전력 제어 등에 많이 사용된다.

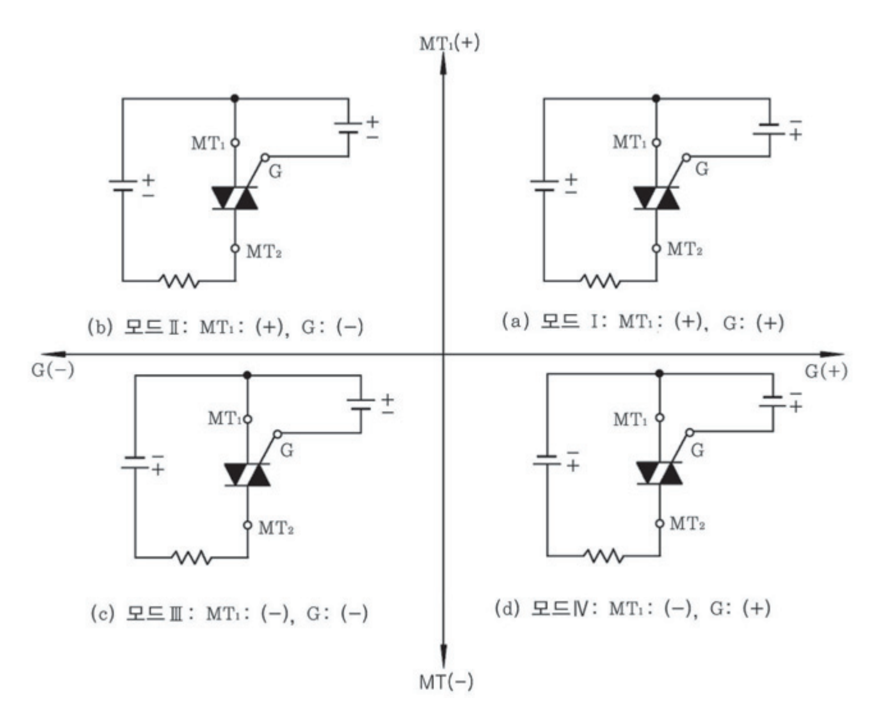


그림 Ⅴ-8 트라이액의 네 가지 동작 모드

5 전력용 트랜지스터(바이폴러형)

전력용 트랜지스터는 전력용 스위칭을 목적으로 사용되는 트랜지스터를 말하며, 그 외형(모듈형)은 그림 Ⅴ-9와 같다.



그림 Ⅴ-9 전력용 트랜지스터의 외형

용량과 패키지 타입에 따라 여러 가지 외형이 있고 대용량 전력용 트랜지스터의 경우에는 모듈형이 대부분이다. 트랜지스터는 PNP형과 NPN형이 있고, 전력용은 NPN형이 주로 많이 사용되고 있다.

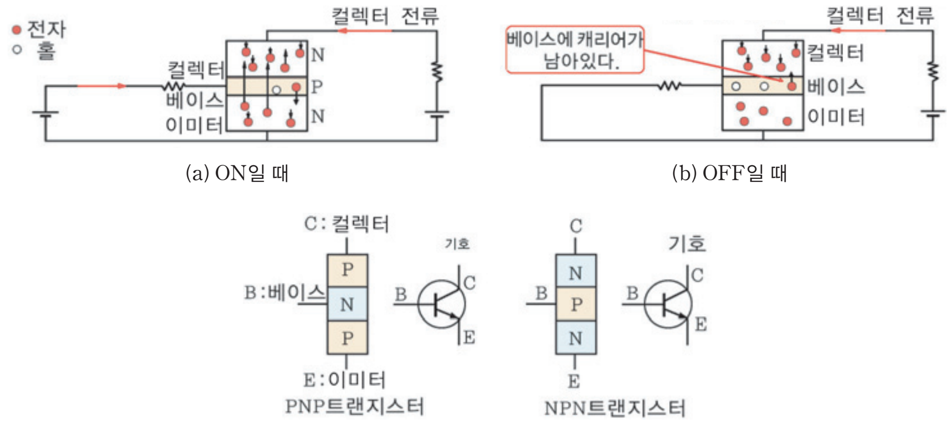


그림 Ⅴ-10 트랜지스터의 동작 원리와 기호

또, 그림 Ⅴ-10의 (a)는 NPN 트랜지스터의 ON일 때의 동작을 보여 주고 있다. 여기서는 이미터에 음(−), 컬렉터에 양(+) 전압을 인가한 상태에서, 베이스 전류가 화살표 방향으로 흘러 들어갈 때에 ON 동작이 되며, 이때를 NPN 트랜지스터에서는 순방향 바이어스로 인가된 상태라고 한다.

그림 Ⅴ-11의 (b)와 같이 베이스 전류가 흐르지 않을 때나 역방향 바이어스 전류가 흐를 때에 OFF가 된다. PNP 트랜지스터 동작 원리는 이미터에 (+), 컬렉터에 (−) 전압을 인가한 상태에서, 베이스 전류가 이미터 쪽에서 베이스 쪽으로 흘러나올 때나, 베이스 전류가 흐르지 않을 때에 ON 동작이 되며, 이때를 순방향 바이어스로 인가된 상태라고 한다. 그 역방향 바이어스 전류가 흐를 때에 OFF가 된다.

전력용 트랜지스터에서는 스위칭 시 발생하는 손실(스위칭 손실)을 줄이기 위하여 포화 영역에서 ON, OFF되게 하고 활성 영역은 사용하지 않는다. 즉, 바이폴러 트랜지스터는 베이스 전류에 비례한 컬렉터 전류가 흐르게 된다. 그림 Ⅴ-11은 트랜지스터의 동작 원리를 상세히 보여 주고 있다.

따라서, 사이리스터나 GTO(Gate Turn Off thyrister)에 비하여 직류 회로 제어가 매우 간단하게 된다. 바이폴러 트랜지스터를 스위칭용으로 사용할 경우에 충분

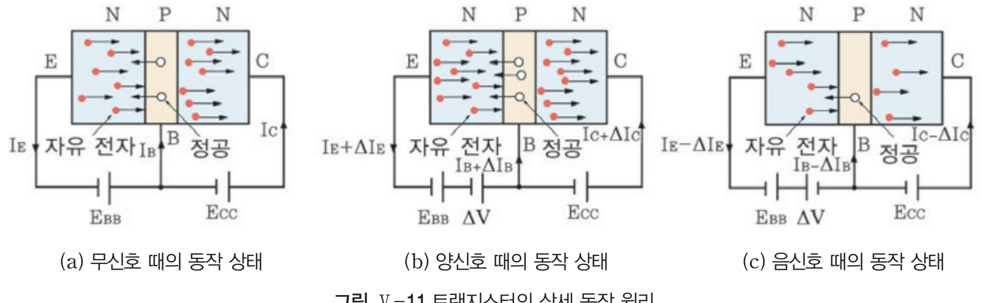


그림 Ⅴ-11 트랜지스터의 상세 동작 원리

한 베이스 전류를 흘려 포화 영역에서 동작시키는 것과, 턴 오프 시간을 짧게 하여 스위칭 전력 손실을 최소화하는 것이 가장 중요한 설계의 핵심이다.

이와 같은 특징이 있기 때문에 바이폴러 트랜지스터는 수 kHz까지의 인버터 회로나 각종 서보모터 드라이버나 초퍼 회로에 사용되고 있다.

6 전력용 MOSFET

그림 Ⅴ-12는 트랜지스터의 안전 동작 영역 특성을 보여 주고 있다. 이 그림에서는 스위칭 주기가 0일 때, 즉 DC 상태로 연속 인가 시부터, 1 ms, 100 μs, 50 μs로 짧아짐에 따라 안전 동작 영역이 넓어짐을 보여 주고 있다. 이것은 전력 제어 시스템에 사용하는 전력용 트랜지스터의 한계 용량은 채용된 스위칭 주파수에 의하여 결정되고 있음을 의미한다.

전력용 MOSFET(metal oxide semiconductor field effect transistor)는 크게 나누어 N 채널 구조와 P 채널 구조로 분류되며, 게이트 신호가 1일 때에 ON으로 되는 인핸스먼트형(enhancement type)과 신호가 1일 때 OFF되는 디플리션 형(depletion type)으로 나뉜다. 전력용으로는 인핸스먼트형이 주류를 이루며, 고내압(450 V 이상)에서는 N 채널 인핸스먼트형 MOSFET가 대부분이다.

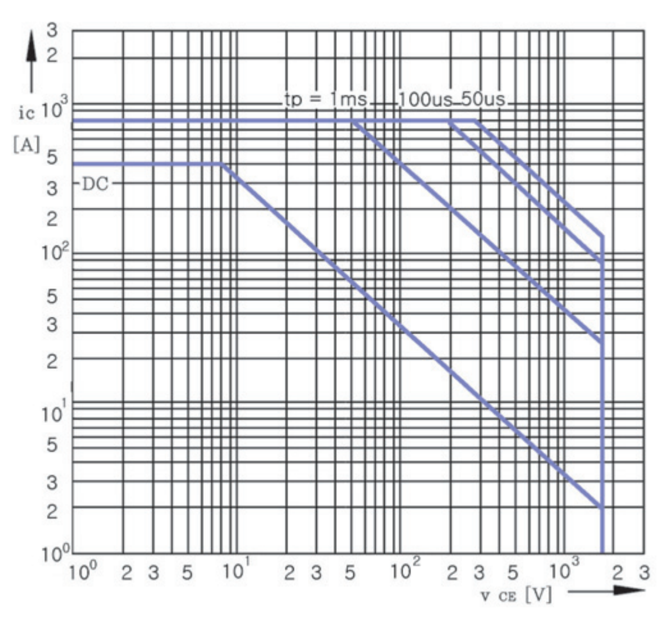
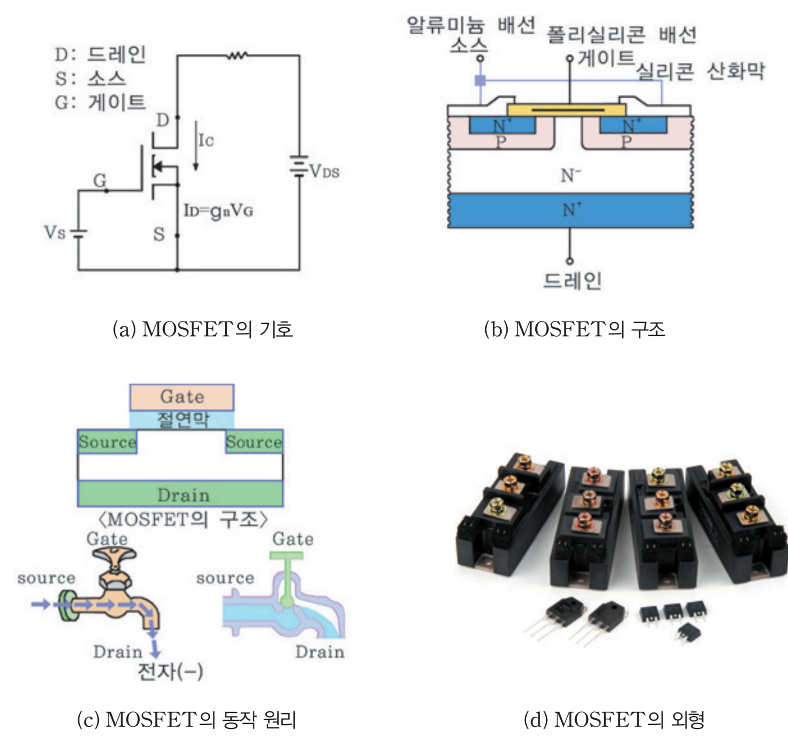


그림 Ⅴ-12 트랜지스터의 안전 동작 영역 특성



(a) MOSFET의 기호

(b) MOSFET의 구조

(c) MOSFET의 동작 원리

(d) MOSFET의 외형

그림 Ⅴ-13 전력용 N패널 MOSFET의 기호, 구조, 동작 원리, 외형

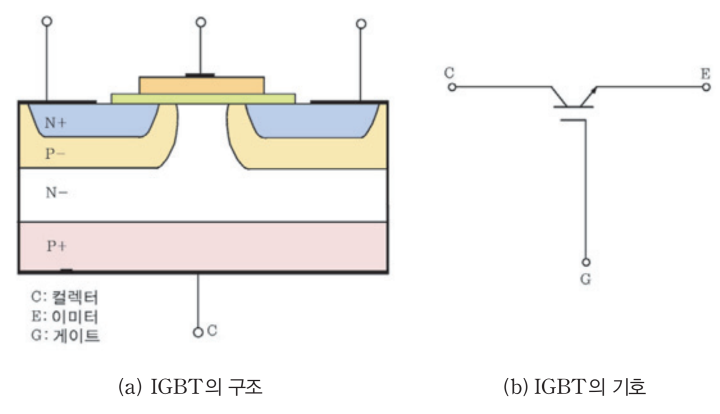
MOSFET의 외형은 기호, 구조, 동작 원리는 그림 Ⅴ-13과 같다. 이 소자는 스위칭 주파수가 높고 저전압, 대전류 제어에 적합한 소자이다.

7 IGBT

IGBT(insulated gate bipolar transistor)는 고속 스위칭, 전압 구동 특성과 바이폴러 트랜지스터의 낮은 ON 전압 특성을 한 칩 내로 복합한 파워 소자이다. 그림 Ⅴ-14는 IGBT의 외형을 나타내고, 그림 Ⅴ-15는 IGBT의 구조와 기호를 보여 주고 있다.



그림 Ⅴ-14 IGBT의 외형



(a) IGBT의 구조 (b) IGBT의 기호

그림 Ⅴ-15 IGBT의 구조와 기호

IGBT는 스위칭 주파수가 높고 대전류, 고전압 사용에 적합하므로 각종 인버터, AC 서보 드라이버나 무정전 전원 장치(UPS), 스위칭 전원 등의 산업 분야에서 뿐만 아니라 근래에는 전자레인지, 전기밥솥, 스토브(난로) 등의 가전용으로 급속히 확대되어 종전의 전력용 트랜지스터를 대체하고 있다.

8 IPM

IPM(intelligent power module)은 IGBT에 게이트 구동 회로(Gate Driver)와 보호 기능 등을 내장시킨 소자로 소형화, 단순화, 사용의 편의성을 높이기 위하여 제작된 소자로 경량화가 필요한 로봇이나, 전기 자동차 등에 사용된다. IPM의 종류에는 단상형과 3상형 모듈이 있다.

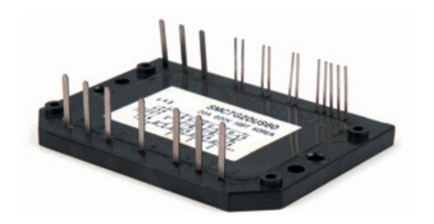


그림 Ⅴ-16 IGBT 3상 인버터 모듈(IPM) 외형

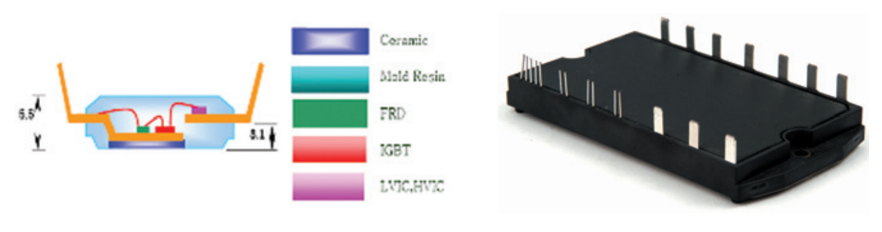
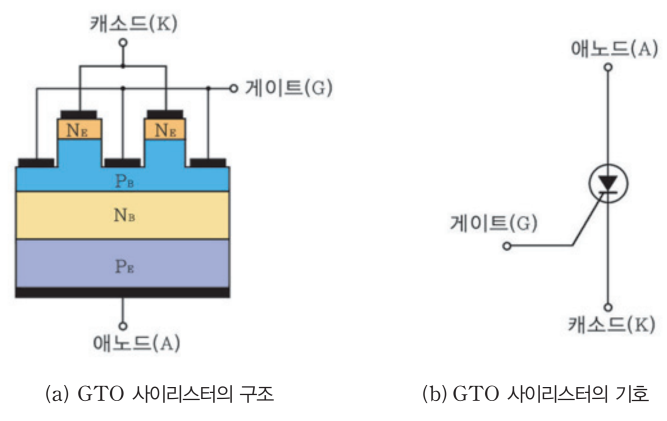


그림 Ⅴ-17 IGBT IPM 내부 구조와 그 외형

9 GTO

GTO(gate turn off thyristor)는 사이리스터의 일종으로 직류 회로에서도 게이트에 마이너스(−) 전류를 흘리면 턴 오프되는 자기 소호형 전력용 반도체이다. 최근에는 대전력에서 고속으로 턴 오프할 수 있는 GTO가 실용화되고 있으며, 전철이나 공업용 인버터에 사용되고 있다. 장점으로는 2 kHz 주파수 이하의 대용량 고전압제어에 적합하다. 단점으로는 턴 오프시키기 위한 게이트 전류가 주 전류의 20 %나 되어, 대용량 게이트 구동 회로가 필요한 단점이 있다.



(a) GTO 사이리스터의 구조　　(b) GTO 사이리스터의 기호

그림 Ⅴ-18 GTO 사이리스터의 구조와 기호

10 SPM

그림 Ⅴ-19는 SPM(smart power module) 외형을 보여 주고 있다. 최근 로봇과 같이 까다로운 부하 조건에서 기동할 수 있는 성능을 필요로 하고, 또 이러한 모터들이 더욱 적은 수의 부품을 요구하는 까닭에 SPM과 같이 모듈화로 이행되고 있다.

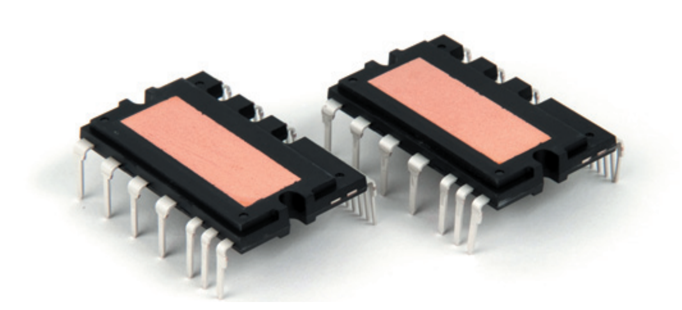


그림 Ⅴ-19 SPM 외형

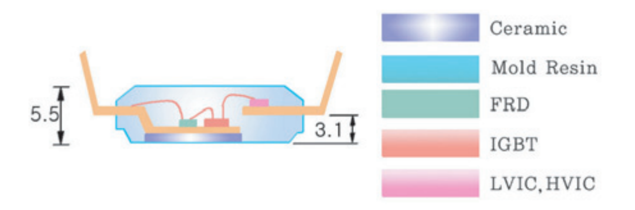


그림 Ⅴ-20 SPM의 구조

3상 SPM 모듈은 세 개의 구동 IC와 여섯 개의 IGBT, 여섯 개의 고속 회복 다이오드(FRD), 두 개의 부트스트랩 다이오드, 더미스터와 다양한 보호 기능을 단일 패키지에 통합시킨 것이다. SPM의 특성을 요약하면 다음과 같다.

- 저손실의 효율적인 IGBT와 FRD는 낮은 EMI 노이즈를 발생시킨다.
- SPM은 내장형 단일 접지형 전원 공급 장치를 제공하며, 이로 인하여 설계를 단순화시킨다.
- 내장형 부트스트랩 다이오드는 외부 부품 수를 감소시키고 회로 배치를 단순화시킨다.
- 내장형 구동 IC는 고 잡음 억제와 보호 기능을 제공한다.
- 최저 열저항과 공간 절약이 가능하다.
- 1500[Vrms/min] 절연 정격 전압과 누설 전류가 매우 낮으며, 안정성이 향상된다.

실습 과제 1

직류 전동기의 속도 제어

<도면>

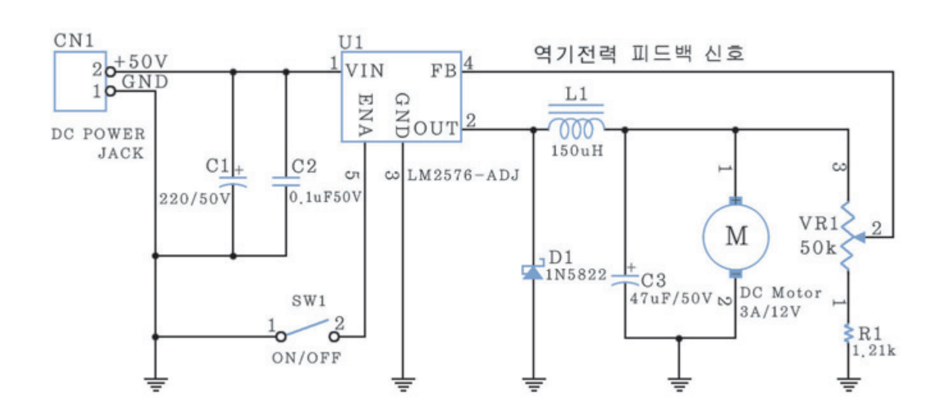


그림 Ⅴ-21 직류 전동기의 속도 제어 회로도

사용 재료와 기기

전원 JACK 1개, 리액터(L_1) 150mA 1대, 다이오드 1N5822 1개, 캐패시터(C_1) 220 μF/25 V 1개, 0.1 μF/50 V 1개, 저항(R_1) 1.21 kΩ 1개, 가변 저항(VR_1) 50 kΩ 1개, 레귤레이터 LM 2676-ADT 1개, DC 모터 12 V/3 A 1개, ON/OFF 스위치 1개, C_3는 47 μF/50 V, 전선 약간

안전과 유의 사항

1. 회로 결선이 정확히 결선 되었는지 최종 확인한다.
2. 오실로스코프를 제작 실물에 물려 파형을 측정 시 오실로스코프의 GND선을 반드시 1선만 사용하여 채널 1과 2의 공동으로 사용하여야 한다. 만약, 반대로 결선하면 오실로스코프의 접지(GND)선이 파손되므로 주의하여야 한다. 반드시 교류 220 V를 오실로스코프 두 채널의 접지선에 의하여 단락되지 않게 주의한다.
3. 220 V의 교류 전압에서 시험하므로 감전에 주의한다.

실습 순서

1. 그림 Ⅴ-21은 스위칭 레귤레이터 구동 회로의 한 예를 보여 주고 있다. 이 회로의 동작을 설명하여 본다.

2. 실물 배치/결선도 작성(도면을 참고하며 부품을 실재 배치하는 것처럼 지면에 배치 후, 결선 상태를 그려 본다. 만족한 배치 상태를 얻을 때까지 반복하여 그려 본다.)

3. 위 2과정에서 작성한 실물 배치/결선도를 참조하여 배치도/결선도와 같이 트랜지스터 구동 회로를 실제 만능 기판에 제작한다.

4. 각부의 파형을 오실로스코프로 관찰한다. 파형 측정 시 교류 220V를 오실로스코프 2채널 접지선이 상호 단락되지 않게 반드시 확인한다.

5. 회로 동작을 제 확인하며 각부 소자의 값을 변경시켜가며 파형을 관찰하고 각 부품의 기능을 확인한다.

6. VR_1을 가변시켜 모터 M이 속도 제어가 되는지를 확인한다. 이때, M(전기자) 양단의 전압을 오실로스코프의 채널 1(ch 1)에 물려 SW_1을 ON/OFF 시 레귤레이터 출력(2번 핀) 파형을 관측하여 그 변화를 관찰한다.

결과 정리

1. 실물 배치/결선도 작성(도면을 참고하며 부품을 실재 배치하는 것처럼 지면에 배치 후, 결선 상태를 그려 본다. 만족한 배치 상태를 얻을 때까지 반복하여 그려 본다.)

2. VR_1을 가변시켜 모터 M이 속도 제어가 되는지를 확인한다. 이때, M(전기자) 양단의 전압을 오실로스코프로 관측하여 그 변화를 살펴본다.

3. 그림 Ⅴ-22는 컴퓨터와 전동기가 통신을 통하여 제어되는 사례로 산업 현장에서 가장 많이 사용되는 자동화 설비의 한 예이다. 통신을 통하여 할 수 있는 내용과 속도 제어의 필요성에 대하여 토론해 본다.

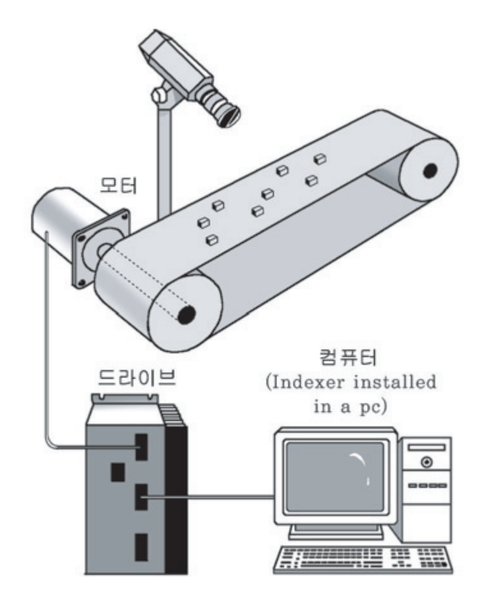


그림 Ⅴ-22 전동기(Motor) 응용 사례



전동기의 위치, 속도와 전류 측정

학습 목표

1. 전동기의 속도 측정 원리에 대하여 설명할 수 있다.
2. 속도 발전기의 종류와 각각의 특성을 설명할 수 있다.
3. 엔코더의 구조를 알고, 속도, 위치 측정 원리를 설명할 수 있다.
4. 전류 센서의 구조와 전류 측정 원리를 설명할 수 있다.
5. 속도 발전기를 사용하여 전동기의 속도를 측정할 수 있다.

1 속도 측정의 원리

속도 측정에는 엔코더(encoder)나 리졸버(resolver)를 사용하는 방법과 속도 발전기(tacho-generator; TG)를 사용하여 회전수에 비례하는 전압을 얻고, 그 전압에 대응하여 속도를 측정할 수 있다. 속도 발전기로 속도계를 만들려면 속도 발전기의 전압을 전압계에 인가하여 전압에 대응되는 속도값을 전압 눈금 대신 속도 눈금으로 기록하면 속도계를 만들 수 있다. 그림 Ⅴ-23은 속도 발전기의 종류와 속도계 외형을 보여주고 있다.

먼저, 속도 발전기를 사용한 속도 측정 원리는 그림 Ⅴ-24와 같이 속도가 $-n$에서 0을 지나 $+n$으로 변함에 따라, 속도 발전기의 출력 전압이 $-V$에서 0V를 지나 $+V$로 속도에 정비례하여 변화한다. 이를 이용하여 속도 측정이 가능하다.



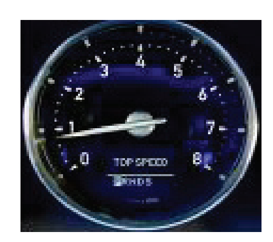



그림 Ⅴ-23 속도 발전기의 종류와 속도계 외형

2 속도 발전기(TG)의 종류

1. 직류 타여자 발전기

직류 타여자 발전기의 구조와 원리는 영구 자석 직류 발전기의 구조와 같으며 그림 Ⅴ-24와 같다. 직류 타여자 발전기는 브러시가 있어 유지 보수가 필요한 발전기 구조이므로, 속도 측정 시 기계적인 부하가 필요하게 되어 토크가 적은 소형 전동기의 속도 측정에는 부적합하다.

2. 단극 발전기

단극 발전기의 구조와 원리는 그림 Ⅴ-25와 같이 자로(磁路)와 갭형 회전자를 모두 단극 발전기로 만들고 일정 계자로 한다. 회전자 속도에 비례하는 직류 전압을 발생시킨다.

단일 도체의 회전자로는 전압이 낮아 2000[rpm]에서도 수 V 밖에 발생시키지 못하지만, 전류는 크기 때문에 부하가 크고 속도-전압 직선성이 우수하여야 하는 곳에 적합하다. 유기 전압이 낮고 브러시 접촉 사항이 직접 출력 전압에 크게 영향을 주므로 사용 시 주의가 필요하다. 슬립 링 사이의 직류 전압은 저속에서도 맥동이 적은 것이 특징이다.

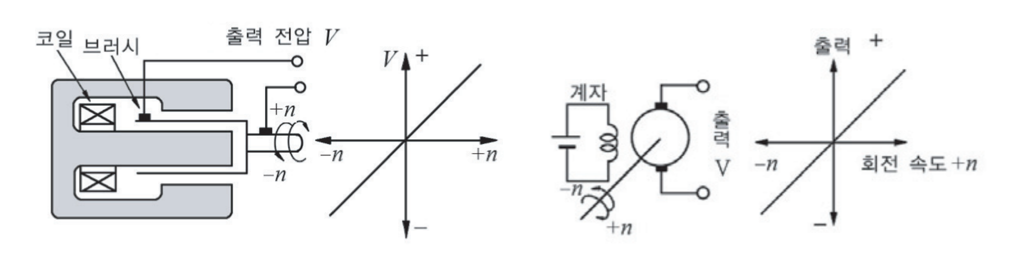


그림 Ⅴ-24 직류 타여자 발전기

그림 Ⅴ-25 단극 발전기

3. 교류 유도 발전기

교류 유도 발전기의 구조와 원리는 2상 서보 전동기와 같은 구조로, 그림 Ⅴ-26과 같다. 고정자의 1차 권선에 일정 주파수(50～400[Hz])의 일정 전압을 인가하고, 1차 권선과 전기각 90°되는 위치에서 2차 권선을 부설하고, 이 2차 권선을 출력으로 한 것이다. 2차 권선의 출력 주파수는 1차와 같고, 크기가 회전 속도에 비례한 전압이 얻어진다. 따라서, 이 전압의 크기를 이용하여 속도를 검출할 수 있다.

교류 유도 발전기는 브러시가 없어 보수가 용이하고, 저속 영역에서는 직선성도 우수하다. 출력 전압의 위상은 회전 방향에 따라 1차 전원 전압의 위상과 반전되기 때문에 교류 서보 전동기와 조합시키는 것이 적합하다.

4. 교류 영구 자석 발전기

교류 영구 자석 발전기는 그림 Ⅴ-27과 같이 영구 자석을 회전자로 한 교류 발전기와 같은 구조로, 회전자 자극수를 많게 한 고주파형이 널리 사용되고 있다.

교류 영구 자석 발전기는 회전자가 영구 자석으로 구성되어 있으므로 여자 전원이 불필요하여, 구조가 간단하고, 유지 보수가 용이한 특징이 있지만, 회전 방향을 판별할 수 없다는 점이 큰 단점이다. 회전 속도 변화에 따라 비례한 전압도 변화되지만 주파수도 함께 바뀌므로, 이 두 가지를 병용하면 고정밀도의 속도 검출기로 사용할 수 있다. 직류 타여자 발전기와 같기 때문에 일반 제어에 널리 사용할 수 있다. 출력 코일을 두 개로 제작하면 방향 판별도 가능한 속도 센서를 만들 수 있다.

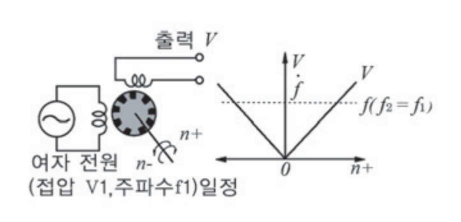


그림 Ⅴ-26 교류 유도 발전기

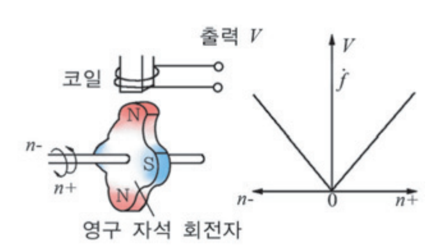


그림 Ⅴ-27 교류 영구 자석 발전기

3 엔코더의 구조와 속도, 위치 계측 원리



그림 Ⅴ-28 엔코더 외형

엔코더는 위치와 속도를 측정할 수 있는 센서로 그림 Ⅴ-28과 같은 외형으로, 절대 위치 제어용인 절댓값 엔코더(absolute encoder)와 상대 위치 제어용인 증분형 엔코더(increment encoder)가 있고, 각각 광학식(光學式)과 자기식(磁氣式)으로 분류된다. 여기서는 광학식 엔코더에 대하여 알아본다.

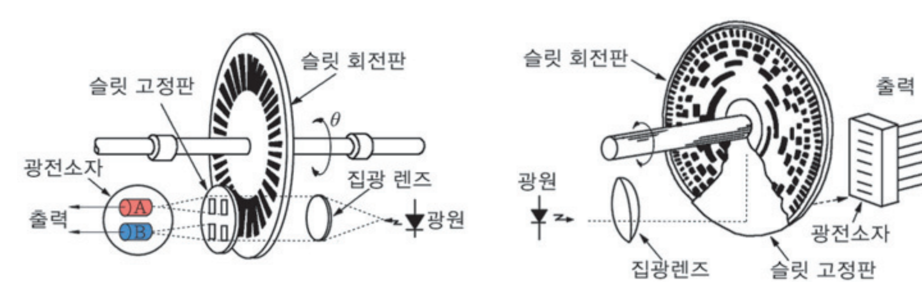


그림 Ⅴ-29 증분식 엔코더의 구조

그림 Ⅴ-30 절댓값식 엔코더의 구조

증분식 엔코더는 일반적으로 엔코더는 증분식을 많이 사용하며 그 구조는 그림 Ⅴ-29과 같다. 그림 Ⅴ-30은 절댓값식 엔코더의 구조를 나타낸 것이다.

전동기 회전 축과 엔코더 축을 커플링을 통하여 연결하고, 전동기가 회전하면 회전판이 회전하여 광원으로부터 조사되는 광을 실크 인쇄된 슬릿(slit) 회전판과 빛의 산란을 막아 주는 슬릿 고정판을 통하여 광전소자 A, B에 전달되어 출력 단자로 펄스열을 출력한다.

이 두 A, B 펄스는 서로 90°의 위상차를 가지고 있어 전동기의 회전 방향도 검출할 수 있다. 엔코더의 분해능의 단위는 1회전당 펄스 수로 나타내며, 한 예로 1000〔pulse/rev〕라고 하면 전동기 1회전당 1000펄스를 출력하는 엔코더를 의미한다.

위치 계측을 위하여는 전동기를 회전시켜 엔코더 출력 펄스가 나오게 되고, 이 펄스를 카운터에 모으면 그 값이 회전 위치(회전각) θ로 되며, 회전 위치(θ)는 다음 식으로 얻어진다.

$$\theta = 2\pi \frac{m}{P} \text{〔rad〕} \qquad (\text{Ⅴ}-1)$$

여기서, θ는 전동기 회전각 위치〔rad〕, m은 일정 시간(T_c) 계측한 엔코더 펄스수, P는 엔코더 1회전당 펄스 분할 수를 나타낸다.

또, 속도 측정은 일정 시간 간격(T_c) 동안 엔코더 펄스를 측정하여 측정값이 m이라고 하면, 이때 전동기 속도는 다음 식으로부터 얻어진다.

$$N = \frac{60m}{PT_c} \text{〔rpm〕} \qquad (\text{Ⅴ}-2)$$

여기서, N은 전동기 속도, m은 T_c동안 계측한 엔코더 펄스 수, P는 엔코더 1회전당 펄스 분할 수를 나타낸다.

4 전류 측정 원리

1. 전류 센서의 원리

전류 센서는 부하와 직렬로 낮은 저항(0.01 Ω)을 접속하여 부하 전류가 흐를 때에 저항양단 전압을 검출하여 전류로 환산하는 방식 즉, 션트 저항(Shunt Register) 방식이 있다. 이 방식은 회로가 간단하여 염가로 구성이 가능하며, 교류 회로나 직류 회로 어디에나 사용 가능한 장점은 있으나 1, 2차 절연(isolation)이 어렵고 대전류 검출에는 적합하지 않는 방식이다.

교류 부하에서는 전류용 변성기가 있으며, 이 방식은 1, 2차 절연은 가능하나 교류 회로에서만 사용이 가능하다는 단점이 있다. 마지막으로, 최근 가장 많이 사용되는 교류, 직류 양용이며, 절연이 가능한 홀(Hall) 전류 센서가 있다.

홀 전류 센서는 그림 Ⅴ-31과 같은 외형으로, 홀 소자를 이용하여 전류 자계의 강도를 전압으로 변환하는 응답성과 선형성이 좋은 전류 센서이다. 구조를 보면 자심을 배치하고 그 갭 사이에 홀 소자를 설치한 모습과 같다.

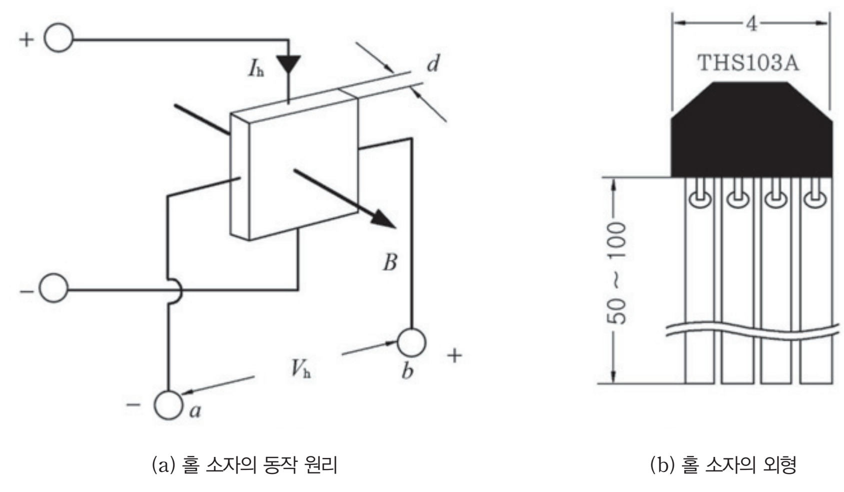


그림 Ⅴ-31 홀 전류 센서의 외형

그림 Ⅴ-32의 (a)에서 홀 소자의 동작 원리를 살펴보면, 모선(가운데 선)에 전류(직류, 교류, 맥류)가 흐르면 갭에는 모선 전류(I)에 비례하는 자속(B)가 생성되어 홀 소자 면에 직각으로 관통한다.

이 상태에서 그림 Ⅴ-32의 (a)의 자속(B)에 대하여 직각 방향에 제어 전류(I_h)를 흘리면 단자 a-b 간에는 모선 전류(I)에 비례하는 전압(V_h)이 발생한다. 홀 전압은 수십 mV의 미소 전압이나 그 출력을 증폭하기 위하여 증폭기를 내장한 제품도 나온다. 홀 전류 센서의 출력 전압은 다음과 같은 식에 의하여 출력된다.

Hall 전압의 크기 V_h는 그림 Ⅴ-32에서 I_h와 자속 밀도 B에 의하여 식 Ⅴ-3과 같이 결정된다.



(a) 홀 소자의 동작 원리　　(b) 홀 소자의 외형

그림 Ⅴ-32 홀 소자의 구성과 홀 소자 외형

$$V_h = R_h \frac{S}{d} B I_h \text{[V]} \qquad (Ⅴ-3)$$

여기서, V_h: 홀 전압,　R_h: 홀 정수,　S: 홀 소자의 단면적

d: 홀 소자의 두께,　B: 자속 밀도,　I: 모선 전류,　I_h: 홀 전류이다.

전류 또는 자속의 방향을 역으로 하면 홀 전압의 극성이 반전된다. 식 Ⅴ-3에서 흐르는 전류(I_h)가 일정하면, 다음과 같은 관계를 가진다.

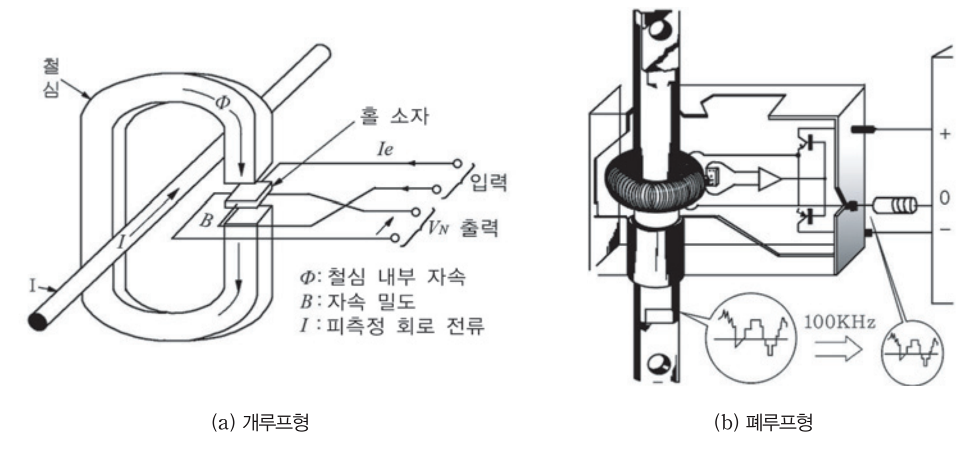
$$S_h = \frac{S}{I_h} = K \qquad (Ⅴ-4)$$

$$V_h = K \cdot B \text{[V]} \qquad (Ⅴ-5)$$

로 되며, 홀 전압 V_h는 자속 밀도 B에 비례하게 된다. 그림 Ⅴ-32의 (a)는 홀 전류 센서의 구성도이고, 그림 Ⅴ-32의 (b)는 홀 소자의 외형도이다. 이런 센서는 홀 전류 센서라고 하여 다음과 같은 특징을 가진다.

- 직류, 교류, 맥류(직류+교류)의 측정이 가능하다.
- 피측정 반도체와 완전하게 절연(isolation)이 된다.
- 전력 손실이 거의 없다.
- 응답 특성이 빠르다.
- 직진성이 우수하다.
- 구조가 간단하여 신뢰성이 좋다.

실제로도 홀 전류 센서는 정밀 전류 측정용으로 사용되고 있다. 한 예로, 전류값을 컴퓨터로 입력하고자 하거나, 오실로스코프를 사용하여 전류를 측정하려면 전류를 직



(a) 개루프형 (b) 폐루프형

그림 Ⅴ-33 홀 전류 센서의 구성도

접 잴 수 없기 때문에 홀 전류 센서를 사용하여 부하 전류를 전압으로 변환하여 사용하게 된다.

홀 전류 센서 출력 전압은 극히 미세할 경우가 많으므로 증폭기(Amplifier)를 사용하여 증폭시켜 사용하고 있다. 그림 Ⅴ-33은 두 종류의 홀 센서의 구성을 보여 주고 있다.



속도 발전기(Tacho Generator) 사용 전동기 속도 측정

<도면>

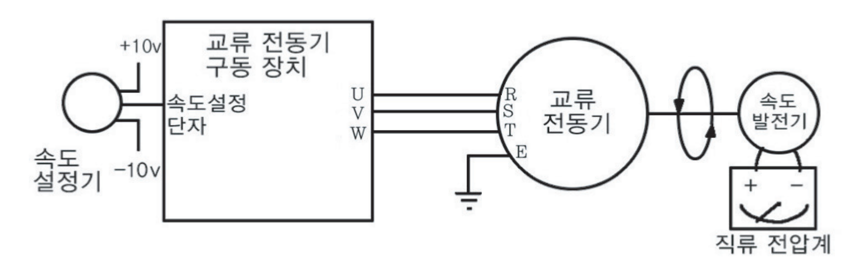


그림 Ⅴ-34 전동기의 속도 측정 결선도

사용 재료와 기기

속도 발전기(TG: 10 v/krpm) 1대, 전동기(3상, 220〔V〕, 0.75〔KW〕) 1대, 타코미터(0~3500〔rpm〕) 1대, 훅 미터(AC/DC 1000A 전류, *R* 측정) 1대, 공구 세트(배선에 필요한 공구) 1조

안전과 유의 사항

1. 회로 결선이 정확히 결선 되었는지 최종 확인한다.
2. 회전체에 인체가 접촉되어 안전 사고가 발생하지 않게 주의한다.
3. 220V의 교류 전압에서 시험하므로 감전에 주의한다.

실습 순서

1. 도면과 같이 전동기 축에 기계적으로 속도 발전기를 연결하고 원활히 회전하는지를 확인한다.
2. 도면과 같이 소용량 교류 전동기 구동 장치(인버터)와 교류 전동기 사이를 결선한다.
3. 속도 설정기를 사용하여 속도를 역회전 → 정지 → 정회전 순서로 회전시켜 가며 속도 측정기와 속도 발전기의 출력선에 연결된 전압계를 읽어 기록한다.

결과 정리

1. 속도 설정기를 사용하여 속도를 역회전 −1000〔rpm〕, −500〔rpm〕, −100〔rpm〕 → 정지(0) → 정회전 100〔rpm〕, 500〔rpm〕, 1000〔rpm〕 순서로 회전시켜 가며 속도 측정기와 속도발전기의 출력선에 연결된 전압계를 읽어 각각 다음 표 Ⅴ-3에 기록한다.

표 Ⅴ-3 기록표

항목 \ 회전수	−1000	−500	−100	0	100	500	1000
속도 측정기 속도〔rpm〕							
직류 전압계 전압〔V〕							

2. 위의 표 Ⅴ-3과 같이 속도를 바꾸어 전동기 회전수(속도)를 실측하고, 그 평균을 계산 후 그 평균값의 의미를 요약 기술한다.
3. 교류 전동기 구동 장치(인버터)와 전동기의 연결시 극성에 대하여 정리해 본다.
4. 이 결과를 이용하여 실속도와 속도 발전기의 전압을 비교하여 그림 Ⅴ-35에 그래프로 그려본다.

보충 과제

속도 측정 원리를 이용하여 속도 발전기 출력 단에 직류 전압계를 연결하고, 그 전압 표시 대신 대응하는 속도를 기록하여 속도계를 만들어 보고, 그 결과를 그림 Ⅴ-35에 전압은 "●"로, 속도는 "○"로 함께 기록하여 본다.

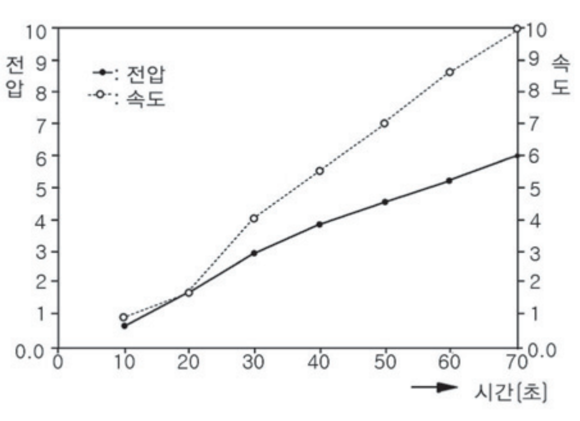


그림 Ⅴ-35 TG의 속도-전압 특성 곡선

풀이

이 학습은 속도 측정 원리를 이해하기 쉽도록 돕기 위한 것이다. 먼저, 속도를 100〔rpm〕, 200〔rpm〕, … 1000〔rpm〕, … 정격 속도까지 변화시켜 가면서 속도 변화와 같은 시점의 속도 발전기 단자 전압을 그림 Ⅴ-35에 동시에 기록하여 그 변화를 관찰한다.




직류 전동기 제어

학습 목표 |

1. 사이리스터를 사용한 전파 정류 회로에 대하여 설명할 수 있다.
2. 위상 제어 방법을 사용한 직류전동기의 속도 제어 방법에 대하여 설명할 수 있다.
3. 직류 전동기의 속도 제어, 토크 제어에 대하여 설명할 수 있다.
4. DC 서보 모터 PWM 제어 회로를 제작할 수 있다.
5. 속도, 전류, 역기전력 피드백 제어에 대하여 설명할 수 있다.

공작 기계, 산업용 로봇 등 속도를 가변시켜야 할 기기의 구동원으로서 직류 전동기(DC motor)가 많이 사용된다. 직류 전동기가 많이 사용되는 까닭은 제어가 용이하고, 토크 특성이 전기자 전류에 비례하기 때문이다. 따라서, 구동 장치(dc motor driver)를 염가로 제작할 수 있다. 여기서는 이 직류 전동기의 특성과 그 구동 장치에 대해 알아본다.

직류 전동기의 속도 제어는 1960년경에는 전기자 권선과 여자 권선을 직렬, 병렬, 직병렬 접속에 따라 직권, 분권, 복권으로 접속하여 제어를 하였다. 그러나 최근에는 직류 전동기의 속도 제어의 기본은 타여자로 결선하여 여자 전류는 일정하게 유지한 상태에서 전기자 전압을 제어하는 방법을 주로 사용한다. 이를 요약하면 표 Ⅴ－4와 같다.

모든 전동기의 제어의 핵심은 얼마의 회전력과 얼마의 속도로 제어할 것인지에 달려 있다.

표 Ⅴ－4 직류 전동기 제어 방법

구분 / 종류	특성	분권과 타여자	직권
계자 제어법	효율 양호 정류 악화 정출력 가변 속도	속도 제어 범위(최저: 최고) 1 : 2~1 : 4(보상 권선이 있을 때)	무부하에서 자속(Φ)가 매우 작으면 속도가 고속으로 되어 위험(주의 필요)하다.
직렬 저항법	효율 불량 정토크 가변 속도	정속도 특성을 잃는다.	직렬 저항법과 전압 제어법을 병용하여 전동차 등에 널리 사용된다.
전압 제어법	가격이 비싸나 광범위한 속도 제어 가능	타여자 전동기에 적용(위드 레오나드 방식, 일그너 방식, 승압기 방식 등이 있다.)	

따라서, 모든 전동기의 제어 성능은 회전력(회전 토크) 제어 성능과 속도 제어 성능에 달려 있다.

직류 전동기의 속도는 식 Ⅴ-6으로, 회전력(T)은 식 Ⅴ-7로 결정된다. 식 Ⅴ-7으로부터 회전력(T)은 전기자 전류(I_a)에 비례한다. 즉, 여자 공극 자속(Φ)와 전기자 저항(R_a)는 전동기가 선정되면 결정되므로, 식 Ⅴ-7로부터 회전력(T)는 전기자 전류(I_a)에 의하여 좌우됨을 알 수 있다. 따라서, 전기자 전류(I_a)를 가변하면, 회전하는 힘을 마음대로 변화시킬 수 있게 된다.

$$N = K_1 V_a = \frac{V_a - I_a R_a}{K_0 \Phi} \text{[rpm]} \qquad (Ⅴ-6)$$

$$T = K_1 \Phi I_a \text{[kg·cm]} \qquad (Ⅴ-7)$$

$$I_a = \frac{V_a - E_b}{R_a} = \frac{V_0 - K_V N}{R_a} \text{[A]} \qquad (Ⅴ-8)$$

$$E_b = K_V N \text{[V]} \qquad (Ⅴ-9)$$

여기서, N: 전동기 회전 수, V_a: 공급 전압(단자 전압), K_0, K_1: 비례 상수, I_a: 전기자 전류, T: 회전력(Torque), K_t: 토크 상수, Φ: 여자 공극의 자속, R_a: 전동기의 권선 저항(전기자 저항)[Ω], K_V: 전동기의 역기전력 상수, E_b: 전동기의 역기전력[V]이다.

직류 전동기는 식 Ⅴ-8과 식 Ⅴ-9로부터 기동 시에 대전류가 흐름을 알 수 있다. 예를 들어, 전기자 전압(V_a)이 100[V]이고, 전기자 저항(R_a)가 0.1[Ω]이며, 역기전력 상수가 10이라고 가정하면, 전전압 기동 시에는 속도(N)가 0[V]이므로(식 (Ⅴ-9) 참조), 역기전력(E_b)이 0[V]로 된다(식 (Ⅴ-9) 참조). 이때, 전기자 전압은 100[V]가 인가될 것이므로 식 Ⅴ-8의 I_a는

$$I_a = \frac{100\text{[V]} - 0\text{[V]}}{0.1\text{[Ω]}} = 1000\text{[A]}$$

라는 막대한 전류가 흐르게 되어 보호 회로가 없다면, 전동기 축이 파괴되거나 전동기나 구동 장치가 손상되는 큰 사고로 이어진다. 따라서, 전류로부터 전동기와 제어기를 보호하기 위하여 실제의 제어기는 기동 시에 전류 제한 회로를 반드시 넣어 주어야 한다.

따라서, 기동 전류를 안전한 수준으로 낮추기 위하여 그림 Ⅴ-36과 같이 외부 저항을 넣어 기동 시 직류 단자 전압을 낮추거나 가변의 직류 전압원을 이용하여 인가 전압을 조정할 필요가 있다.

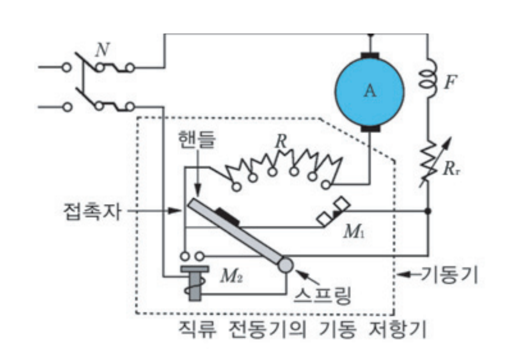


그림 Ⅴ-36 기동기(Reostart)

그림 Ⅴ-36과 같이 외부 저항을 넣었을 때에 전동기가 기동하는 동안에 전기자 전류는 다음과 같다.

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a + R_e}$$

여기서, V_t: 단자 전압, E_a: 전기자 역기전력, R_a: 전기자 저항, R_e: 전기자와 직렬로 연결된 외부 직렬 저항이다. 속도가 증가하면 역기전력 E_a도 증가한다. 따라서, 속도가 증가함에 따라 외부 저항의 값을 점차 줄여 나가도 전기자 전류는 일정한 값을 넘지 않는다. 이와 같은 동작을 하는 것이 그림 Ⅴ-36의 기동기이다.

로봇 제어에는 시스템 안정성과 빠른 속도 응답성이 필요하다. 위의 식으로부터 속도 응답을 높이기 위하여는 전기자 전류(I_a)를 높여 회전력(Torque)을 높여 주는 방법을 가장 많이 사용한다. 그러나 이때, 전류를 제한하지 않으면 전동기 자체의 권선이 소손되거나 구동부 전력용 반도체가 파손될 우려가 있다.

제어기도 대전류를 흐르게 하려면 대용량의 드라이버를 사용하지 않으면 안 된다. 따라서, 이 기동 전류와 브레이크 전류(N을 1000rpm, V_a를 100V에서 0V의 계단 입력으로 하면 I_a는 부(-)로 되어 브레이크 전류로서 동작함.)를 제한하기 위한 회로가 필요하다. 이것이 전류 제한 회로이다. 직류 전동기 구동 회로에는 대부분 전류 제한 회로가 있어야 한다. 서보 직류 전동기는 응답성을 좋게 하기 위하여 이 기동 전류를 정격 전류의 5~6배 정도에 견디게 설계되어 있다.

직류 전동기는 회전수를 제어하기는 쉽지만 정류자(commutator)와 브러시와의 접촉으로 전기자 전류가 공급되므로 다음과 같은 현상은 피할 수 없다.

- 브러시가 마모한다. → 교환이 필요하다.
- 틈이 반드시 생긴다. → 전류가 흐를 때에 불꽃이 생긴다(노이즈의 원인).
- 접촉 저항이 있다. → 효율이 나쁘게 된다.

이들의 결점을 보완하기 위한 것이 최근 주목을 끌고 있는 브러시 없는 D.C 서보 전동기이다. 직류 전동기의 특성을 유지하면서 브러시를 제거한 것이다. 전동기 자체의 구조는 회전축에 영구 자석을 사용한 교류 동기 전동기와 거의 같다.

브러시 없는 전동기의 개발에는 최근 급속히 발달된 반도체 기술이 크게 공헌하였다. 종래로부터 있었던 브러시 없는 전동기의 제어기는 직류 전동기의 제어기보다도 복잡하다. 그러나 기본적으로는 큰 차가 없다. 직류 전동기의 제어 회로를 이해하는 것이 여러 가지의 전동기 제어를 이해하는 지름길이다.

직류 전동기의 속도 제어에는 전기자 전압 제어 방식 중에서 사이리스터를 사용하여 위상 제어를 하는 방법과 전력용 트랜지스터, MOSFET, IGBT 등을 사용하여 PWM 제어를 하는 방법으로 분류할 수 있다. 전자는 대용량에서 준정밀 제어에, 후자는 중용량 이하에서 정밀 또는 초정밀 서보 제어에 주로 사용한다.

정류 방법에는 정류기에 공급되는 교류 전원의 상수에 의한 방법과 교류 전원의 1주기 동안에 부하 회로에 공급하는 전류 펄스 수에 따르는 방법이 있다. 즉, 정류 상수에 따라 단상 정류 방법과, 3상 정류 방법이 있고, 파형의 펄스 수에 따라 반파 정류 방식과 전파 정류 방식이 있다. 여기서는 가장 많이 사용되고 서로 대칭적으로 변화하는 3상 교류 전파 정류 파형과 PWM 제어에 대하여 알아본다.

1 사이리스터 위상 제어

그림 Ⅴ-37은 산업 현장에서 사용되는 범용 단상 사이리스터 컨버터 회로를 보인 것이다. 여기서 위상 제어란 주기는 전압 파형의 반주기로 결정되며, 게이트 구동 펄스(Gate Driver Pulse)의 지연각 $\alpha = (255 - \text{duty}) \times 39[\mu s]$를 좌우로 조절하면 전압 파형의 사선 부분의 면적이 조절되어 제어하는 방법이다.

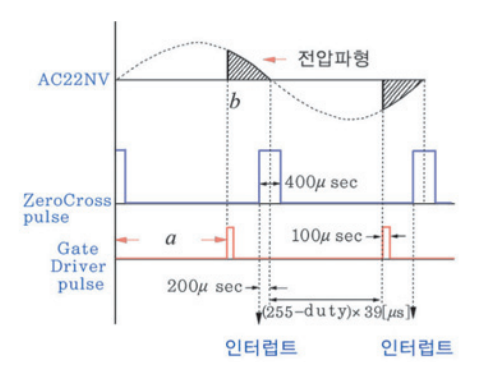


그림 Ⅴ-37 위상 제어 원리

디지털 위상 제어 방식에서는 마이크로프로세서를 사용하여 그림 Ⅴ－37의 아래쪽 매 인터럽트 주기마다 지연각 α를 계산하여 사이리스터 게이트 드라이버 펄스를 그 계산된 지연각만큼 지연시킨 후, 전원의 영점 교차 펄스(Zero Cross Pulse)와 동기시켜 인가하는 방식으로 제어한다.

1. 단상 전파 제어 정류기

전동기의 정격 전기자 단자 전압과 교류 전원 단자 전압이 같으면, 그림 Ⅴ－38의 (a)에서의 변압기는 필요 없게 되지만 절연용으로 두는 것도 좋다.

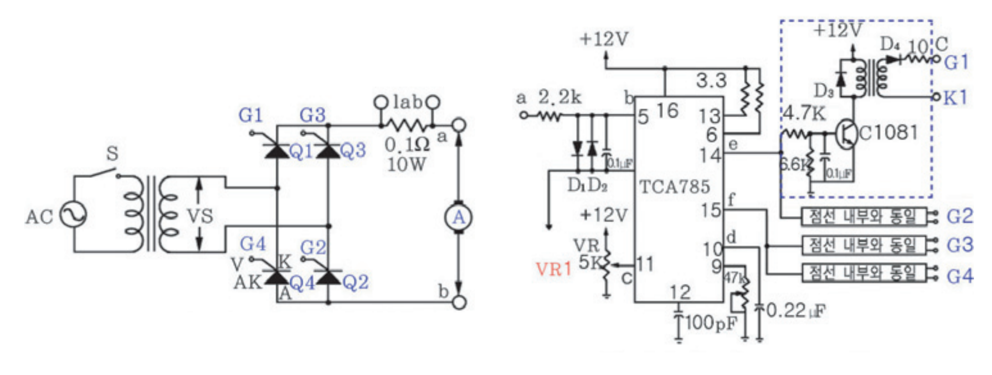
교류 파형의 0전압 교차점(Zero Cross)을 기준으로 정의 반주기 동안을 G1, G2가 부의 반주기 동안은 G3, G4가 각각 분담하여 제어한다.

이 그림에서는 정현파로 $\omega_t = 0$에서 단자 전압을 공급하고 $\omega_t = \alpha$만큼 지연시킨 후에 사이리스터 $Q_1 \sim Q_4$를 반주기마다 "ON"시킨다.

그림 Ⅴ－38의 (b)는 사이리스터 게이트 구동 회로로 저속에서 동작하는 저전압 전동기의 경우에는 그림 Ⅴ－38의 (a)의 회로가 전기자 회로에 두 개의 사이리스터가 직렬 연결 되었기 때문에 순방향 전압 강하만큼 전기자 전압이 낮아지게 된다.

또, 한 가지 중요한 것은 그림 Ⅴ－38의 (a)의 컨버터에서는 두 개의 직렬로 연결된 사이리스터에서 두 곳 모두 손실이 발생한다는 점이다.

그림 Ⅴ－38의 (b)는 그림 Ⅴ－38의 (a)의 단상 컨버터의 사이리스터 게이트 구동 회로를 보여 주고 있으며, 그림 Ⅴ－39는 게이트 구동 회로의 각부의 동작 파형을 보여 주고 있다. 이 그림 Ⅴ－38의 (b)에서 제어 전압 VR_1을 가변시키면 Q_1, Q_2와 Q_3, Q_4의 위상각이 제어됨을 확인할 수 있다.



(a) 직류 전동기 사이리스터 위상 제어(단상)　　(b) 사이리스터 게이트 구동 회로

그림 Ⅴ－38 사이리스터를 사용한 위상 제어 회로

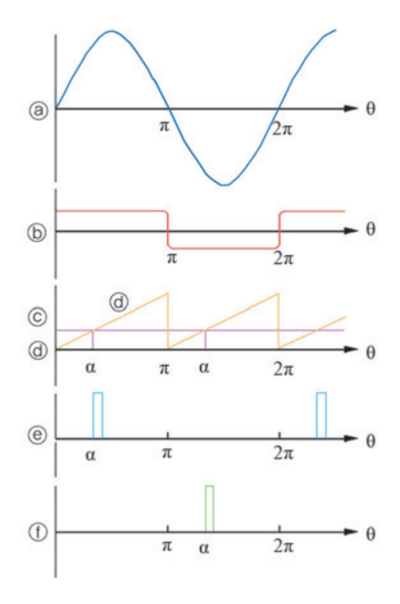


그림 Ⅴ-39 TCA785 각 핀의 파형

2. 3상 전파 정류 제어기

그림 Ⅴ-40은 산업 현장에서 가장 많이 사용되는 3상 범용 컨버터 회로를 보인 것으로 여자 전류를 제어하는 방법은 단순화를 위하여 이 그림에서는 생략되어 있다. 만약, 사이리스터 정류기가 여자 전원으로서 사용될 때, 여자 전류를 제어하기 위하여는 별도의 여자 전류 구동 회로가 필요한 것은 단상에서와 같다.

3상에서는 그림 Ⅴ-38과 같이, 사이리스터 Gate 구동 회로가 각 상별로 한 개씩 모두 세 개가 필요하며 제어 방식은 각 상별로 보면 단상과 같다.

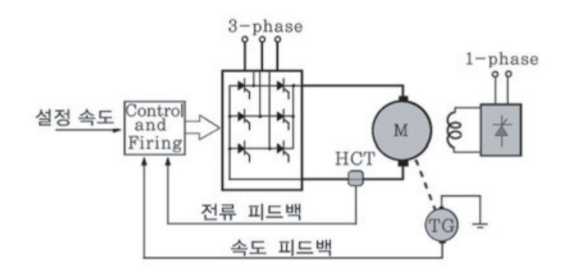
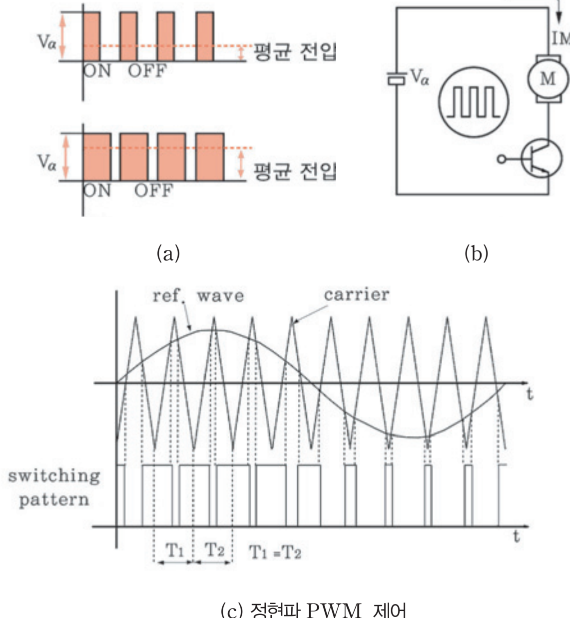


그림 Ⅴ-40 사이리스터 3상 위상 제어용 전파 제어 컨버터

2 PWM 제어

반도체 스위칭 시에는 ON, OFF 영역에서 스위칭 손실이 가장 적다. 이를 이용하여 주기를 일정히 하면서 ON 시간을 조정하여 그림 Ⅴ-41과 같이 평균 전압을 가변



(c) 정현파 PWM 제어

그림 V-41 PWM 제어의 원리

시켜 직류 전동기를 제어하는 방법을 전동기의 PWM(Pulse Width Modulation) 제어라고 한다.

3 폐루프 제어(PID 제어)

PID(Proportional−plus−Integrate−plus−Derivative) 제어기는 비례-적분-미분 제어기로서, 실제 산업 현장에서 가장 많이 사용되는 제어 기법이다. PID 제어는 적용 시스템의 안정도를 높여 주고, 빠른 응답과 정상 오차를 최소화시켜 주는 기능을 한다. 그림 V-42는 PID 속도 제어기와 PID 전류 제어기가 직렬로 접속되어 DC 전동기의 속도 제어를 하는 예로서, 이 중에서 앞쪽 PID 속도 제어기를 대상으로 설명하여 본다.

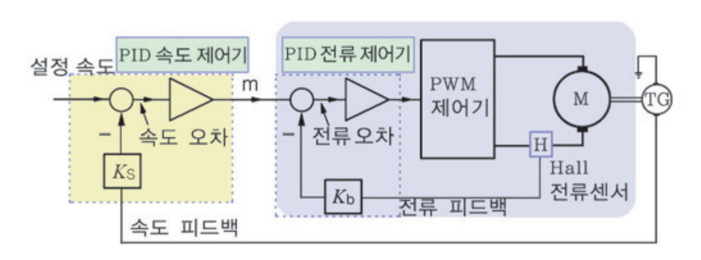


그림 V-42 DC 전동기와 속도 제어 블록도

$$
\left.\begin{aligned}
m &= K_P \cdot e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \cdot \frac{d}{dt}e(t)dt \\
&= \text{P(비례항)} + \text{I(적분항)} + \text{D(미분항)}
\end{aligned}\right\} \quad (\text{V}-11)
$$

여기서, m: PID 제어기 출력, K_P: 비례 이득, K_I: 적분 이득, K_D: 미분 이득이다.

PID 제어기의 K_P, K_I, K_D 값을 변경시켜 전동기의 응답 특성 개선과 안정도 향상을 얻을 수 있다.

비례 이득 값은 플랜트 응답의 상승 시간(rise time)을 줄이는 효과가 있으나, 정상 상태 오차(steady state error)를 없애지는 못한다.

적분 이득은 정상 상태 오차를 제거하는 효과를 가지고 있지만, 과도 응답 특성을 나쁘게 만들 수 있다.

미분 이득의 값은 시스템의 안정도를 향상시키는 효과를 가지고 있어서, 오버 슈트를 줄이고 과도 응답 특성을 향상시킬 수 있다.

그림 V-42에 속도 제어만을 위한 블럭도를 나타내었다. 속도를 고정도(高精度)로 제어하는 데에는 전동기의 속도를 충실히 제어기에 피드백(feedback)하는 검출기가 필요하다. 전동기의 속도를 일정하게 유지하는 것은, 즉 속도 지령값이 일정할 때에는 검출기의 전압을 일정하게 유지하는 것이다.

그림 V-43은 PID 파라미터 K_P, K_I, K_D 값을 변경시켰을 때의 전동기의 계단 응답 특성을 보여 준다.

또, 제어기는 아날로그(analog) 속도 제어기와 디지털(digital)이 혼재하여 있다. 제어기의 대부분은 PID이라고 불리는 방식으로 제어한다. 속도 지령도 일반적으로 아날로그 전압으로 주어지기도 하고, 디지털 스위치로 설정하여 주기도 한다.

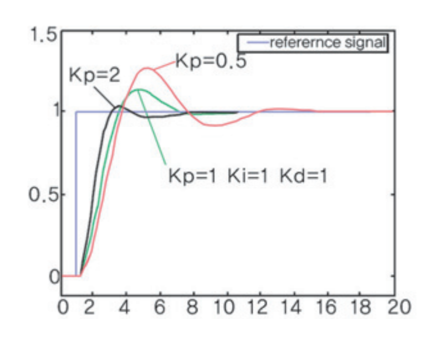


그림 V-43 PID 파라미터에 의한 계단 응답 특성

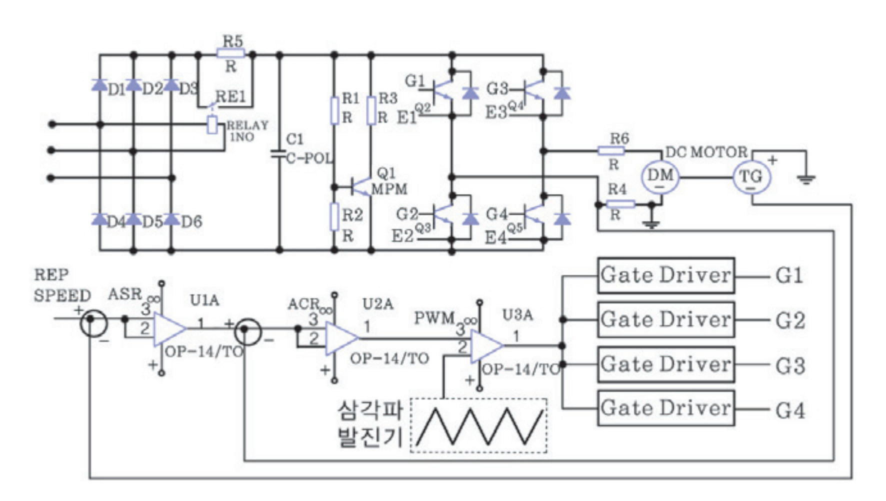


그림 Ⅴ-44 DC 서보 전동기의 구성

전류 검출 회로는 전원 회로와 절연시켜 피드백시키는 경우가 많으며, 홀(hall) 소자를 이용하기도 하고 션트 저항(shunt resister)과 절연 앰프를 조합하여 제어계에 피드백시키는 것이 일반적이다.

그림 Ⅴ-44의 속도 제어 회로(automatic speed regulator; ASR), 전류 제어 회로(automatic current regulator; ACR), PWM 발생기는 캐리어 삼각파 발생 회로와 비교기(comparator) 회로로 구성되어 있고, 이 회로는 각각 연산 증폭기가 사용되고 있다.

연산 증폭기에는 1개인 것부터 2~4개의 것까지 여러 종류가 있으며, 용도에 맞게 각각의 회로에 요구되는 특성을 선택하여 사용하는 것이 중요하다.

온도 표류(drift)가 있어도 좋은 회로에 저 표류(drift) 연산 증폭기를 사용하면 과잉 품질로 가격 상승 효과를 가져와 가경 경쟁력이 떨어진다.

그림 Ⅴ-45의 직류 전동기의 PWM 제어 방식 중 유니폴러 모드에서의 동작은 다음의 네 단계로 전류가 구분되어 흐른다.

1단계 그림 Ⅴ-45의 회로에서 Tr_1, Tr_4이 턴온되면, $+V_s \rightarrow Tr_1 \rightarrow$ Ⓜ $\rightarrow Tr_4 \rightarrow -V_s$로 I_a가 흘러 DC 서보 Motor는 시계 방향(CW)으로 회전하기 시작한다(CW Motoring Operation).

⬇

2단계 Tr_2, Tr_4가 턴온되면, 부하는 인덕턴스 부하이므로 흐르든 전류는 급격하게 바뀔수 없어 흐르던 전류는 그대로 지속하여 흐르려는 경향이 있어 다음 경로

로 순환 전류가 흐른다(Ⓜ → Tr_4 → D_2 → Ⓜ). 한편, 이때 발생한 역기전력은 Ⓜ → Tr_2 → D_4→ Ⓜ로 흘러 브레이크 작용을 한다.



3단계 Tr_1, Tr_4가 턴 온되면 다시 1단계의 경로로 전류가 흐르게 된다.



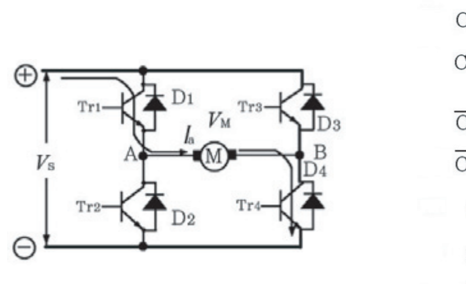
4단계 Tr_1, Tr_3가 턴 온되면, 전류는 Ⓜ → D_1 → Tr_3 → Ⓜ로 서보 모터의 역기전력이 흐르게 되고, 이때 역기전력 전류는 역방향으로 흘러($-I_a$) 역토크를 발생시킨다. 즉, 브레이크 동작(회생 동작)을 하게 됨과 동시에, 부하의 인덕터 성질에 의한 순환 전류도 다음 경로로 흐르게 된다.
Ⓜ → D_3 → Tr_1 → Ⓜ이어서 1~4단계까지의 동작을 반복하며 연속적으로 CW 방향으로 회전을 계속하게 된다.

또, CCW 방향으로 회전시키려면,

① 그림 Ⅴ-45의 회로에서 Tr_3, Tr_2이 턴 온되면, $+Vs$ → Tr_3 → Ⓜ → Tr_2 → $-Vs$로 I_a가 흘러 DC 서보 모터는 CCW(시계 반대 방향)으로 회전하기 시작한다(CCW Motoring Operation).

② Tr_2, Tr_4가 턴 온되면, 부하는 인덕턴스 부하이므로 흐르든 전류는 급격하게 바뀔 수 없어 흐르던 전류는 그대로 지속하여 흐르려는 경향이 있어 다음 경로로 순환 전류가 흐른다(Ⓜ → Tr_2 → D_4 → Ⓜ). 한편, 이때 발생한 역기전력은 Ⓜ → Tr_4 → D_2 → Ⓜ로 흘러 브레이크 작용을 한다.

③ Tr_3, Tr_2가 턴 온되면 다시 ①의 경로로 전류가 흐르게 된다.



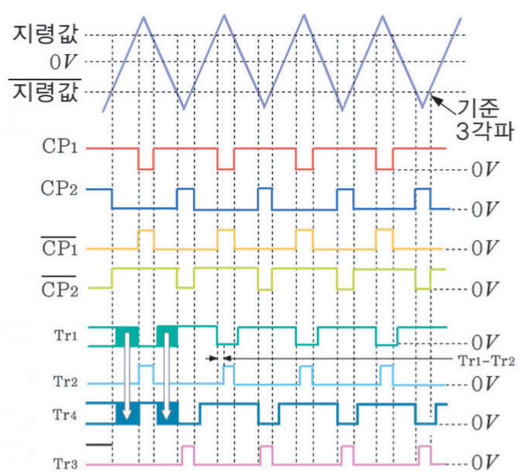


그림 Ⅴ-45 유니폴러 모드 동작

④ Tr_1, Tr_3가 턴 온되면, 전류는 Ⓜ → D_3 → Tr_1 → Ⓜ로 서보 모터의 역기전력이 흐르게 되고, 이때 역기전력 전류는 역방향으로 흘러($-I_a$) 역토크를 발생시킨다. 즉, 브레이크 동작(회생 동작)을 하게 된다. 동시에 부하의 인덕터 성질에 의한 순환 전류도 다음 경로로 흐르게 된다.

Ⓜ → D_1 → Tr_3 →Ⓜ 이어서 ①~④까지의 동작을 반복하며 연속적으로 CCW 방향으로 회전을 계속하게 된다.



스테핑 모터의 속도 제어

학습 목표 |

1. 스테핑 모터의 종류와 각각의 특성에 대하여 설명할 수 있다.
2. 스테핑 모터의 구조와 회전 원리에 대하여 설명할 수 있다.
3. 유니폴러 구동과 바이폴러 구동 원리와 특성에 대하여 설명할 수 있다.
4. 스테핑 모터의 마이크로 스텝 방식의 속도 제어 원리에 대하여 설명할 수 있다.
5. 마이크로스테핑 방식의 속도 제어를 할 수 있다.

1 스테핑 모터의 개요

스테핑 모터(Stepping Motor)의 외형은 그림 Ⅴ−46과 같고, 하나의 입력 펄스 신호에 대하여 일정한 각도만큼 회전하는 모터이다. 따라서, 스테핑 모터의 총 회전 각도는 입력 펄스 신호의 수에 비례하고 회전 속도는 펄스 주파수에 비례한다. 이 때문에 펄스 신호의 수와 주파수를 제어함으로써 오픈 루프 제어만으로도 회전각과 위치(회전수에 상당) 제어가 되므로 모터의 제어가 간단하고, 또 디지털 제어 회로와 조합도 용이하다. 이 밖에도 다음과 같은 장점이 있다.

- 기동, 정지, 정회전, 역회전이 용이하고 신호에 대한 응답성 좋다.
- 브러시 등의 접촉 부분이 없어 수명이 길고 신뢰성이 높다.
- 제어가 간단하고 정밀한 동기 운전이 가능하고, 또 고속 시에 발생하기 쉬운 미스스텝(miss step)도 누적되지는 않는다.
- 브러시 등의 특별한 유지 보수를 필요로 하지 않는다.

위와 같은 장점이 있기 때문에 공작 기계, 수치 제어 장치, 로봇 등의 서보 기구에 사용되는 대형 스테핑 모터에서 프린터, 플로터 등과 같은 컴퓨터의 주변 장치나 사무 기기에 채용되는 소형 모터까지 넓은 분야에서 사용되고 있다.

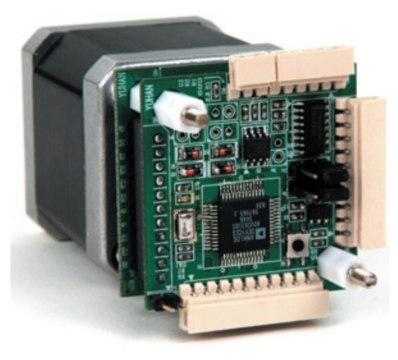


그림 Ⅴ−46 스테핑 모터와 드라이버 일체형

2 스테핑 모터의 종류

스테핑 모터에는 고정자와 회전자의 구조, 구성에 따라 여러 가지 형식의 모터가 있다. 고정자 측에 설치된 여자 권선의 상수에 의하여 2상, 3상, 4상, 5상형으로 분류된다. 또, 기계적 구조에 의하여 각 상의 자기 회로를 축 방향으로 직렬로 배치한 다층형과 각 상을 한 철심 위에 평면적으로 배열한 단층형으로 분류된다.

기타 여자 권선을 감는 방법이나 자기 회로의 형식 등에 따라서 분류된다. 이들의 각 형식을 조합함으로써 각종 모터 형식이 생길 수 있으나, 실용적으로는 각각 장단점이 있어 반드시 조합된 형식의 모터가 제작되는 것은 아니다. 필요에 따라 각각의 장점을 살려 선정하여 사용하는 것이 보통이다.

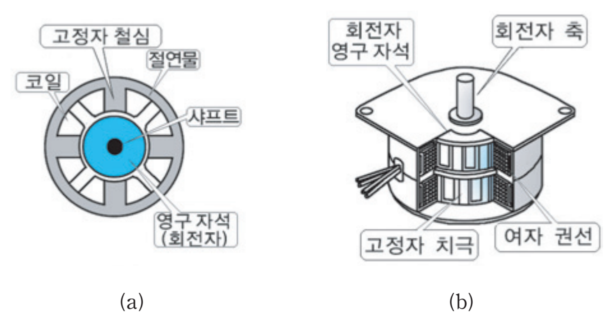
스테핑 모터는 자기 회로의 형식에 따라 PM형(영구 자석형, permanent magnet type), VR형(가변 릴럭턴스형, variable reluctance type), HB형(복합형, hybrid type)으로 나뉜다.

3 스테핑 모터의 구조

1. PM형

PM형 스테핑 모터는 그림 Ⅴ-47과 같이 회전자는 원주 방향으로 자화된 원통형 영구 자석으로 되어 있고, 고정자는 90° 간격으로 떨어진 네 개의 돌극 철심에 권선을 감아 준 구조로 되어 있다.

이 PM형의 특징은 회전자가 영구 자석으로 되어 있기 때문에 무여자 시에도 잔류 토크(residual torque)를 가지고 있으며 스텝 각도 큰 결점이 있다.



(a) (b)

그림 Ⅴ-47 PM형 스테핑 모터의 구조

2. VR형

VR형 스테핑 모터는 그림 Ⅴ-48과 같이 회전자는 연철 또는 성층 규소 강판을 사용하여 기어 모양으로 가공한 원통형의 구조로 되어 있다.

고정자는 30° 간격으로 12극의 기어 모양으로 규소 강판을 겹쳐서 철심으로 하는 적층형의 고정자로 구성되어 있다. 이와 같이 적층시켜 만든 것을 스택이라고 한다.

고정자 측 권선을 여자하여 회전자를 흡입하면서 동작하는 것으로, 스택을 여러 층 축 방향으로 치(齒)를 어긋나게 겹쳐서 3상 이상의 다상형의 모터를 만든다. 이 형의 특징은 회전자가 영구 자석으로 되어 있지 않으므로 무여자 시에 잔류 토크가 없고, 관성이 적으며 응답 특성이 고속이다.

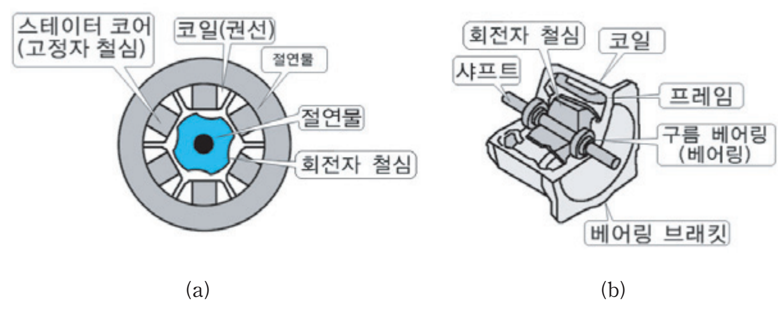


그림 Ⅴ-48 VR형 스테핑 모터의 구조

3. HB형

HB형 스테핑 모터는 그림 Ⅴ-49와 같이 기어 모양의 규소 강판을 겹친 회전자 블록 두 개 사이에 축 방향으로 자화된 영구 자석을 삽입 조립하여 PM, VR 복합형의 회전자를 구성한 것으로, 고정자는 45° 피치로 여덟 개의 자극에 복수의 빗 모양의 치극(齒極)이 있고 고정자 여자 권선은 분포권을 채용하고 있다.

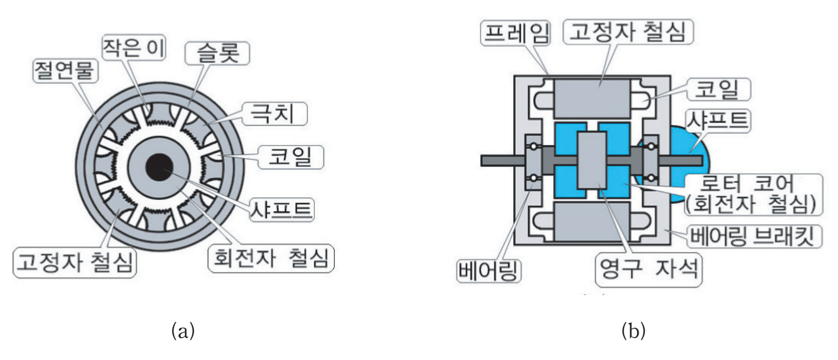


그림 Ⅴ-49 HB형 스테핑 모터의 구조

이 형의 특징은 무여자 시에 잔류 토크가 있고 고정밀도, 고토크, 작은 스텝 각(보통 1.8°)을 가지고 있다. 일반적으로 컴퓨터 주변 장치나 사무 기기에 많이 사용되고 있는 소형 스테핑 모터는 PM형이 많고 VR형 또는 HB형 스테핑 모터는 중·대형의 모터로 채용되는 경우가 많다. 표 Ⅴ-5는 여러 가지 스테핑 모터의 대표적인 구조와 특성을 나타낸 것이다.

표 Ⅴ-5 스테핑 모터의 구조와 특성

고정자	프레스형	다층형	단층형	
회전자	PM형	VR형	VR형	HB형
스텝 각	36∼18°	0.36∼15°	0.9∼15°	0.9∼7.5°
토크	작다.	크다.	중간이다.	중간∼크다.
운전 주파수	작다.	크다.	중간이다.	중간이다.

4 스테핑 모터의 제어

스테핑 모터를 동작시키려면 수동으로 스위치를 전환하는 방법도 있다. 그러나 모터를 수동으로 1.8°만 회전시키고 싶다는 등의 특수한 경우를 제외하면 스위치를 손으로 전환하는 방법은 비현실적이다. 실제로는 전자 회로를 조합하여 모터의 여자 순서 회로를 만들어 주게 된다. 또, 복잡한 장치에서 정확한 위치 결정이 필요한 용도로 사용될 때에는 마이크로컴퓨터로 제어하는 방법을 가장 많이 사용하고 있다.

스테핑 모터를 구동할 때에는 모터의 상 여자 방식에 따라 그 특성이 달라진다.

스테핑 모터의 구동 방법은 그 권선에 어떤 형태로 전류를 흐르게 하는지에 따라 구별되고 있다. 이것은 모터의 종류에 따라서도 달라지지만, 가장 많이 사용되고 있는 HB형 스테핑 모터로서 스텝 각 1.8°의 경우를 예로 설명한다. 그림 Ⅴ-50은 HB형 4상 모터의 권선 구조이다.

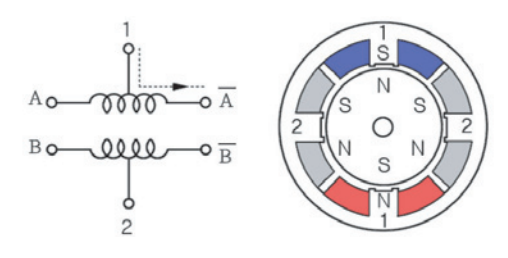


그림 Ⅴ-50 HB형 4상 모터의 권선

이 예의 경우에는 각각 상마다 고정자 치에 코일이 감겨 있다. 또, A와 $\overline{A}$가 B와 $\overline{B}$가 각각 공통 선으로 묶여(1, 2) 외부로 나와 있는 모터도 있다.

이 모터의 코일에 전류를 어떻게 흘리는지에 따라 구동(상여자) 방법이 달라지며, 보통 유니폴러 구동과 바이폴러 구동으로 나뉜다.

1. 유니폴러 구동

그림 Ⅴ-51은 유니폴러 구동 회로의 예이다. 각각의 코일에 한 개의 전력용 소자(Q1∼Q4)를 접속하고 그 소자를 ON 하는 것으로 각 코일에 전류를 흐르게 하는 방법이다. 그림 Ⅴ-51을 보면 알 수 있듯이, 1 방향으로 코일에 전류(A, B, $\overline{A}$, $\overline{B}$)가 흐른다. 이와 같이 코일에 전류를 한 방향으로만 흐르게 한 데에서 유니폴러(단극성) 구동이라 부르게 되었다.

이 구동 방식은 코일에는 동일 시간에 A상, $\overline{A}$ 상 또는 B상, $\overline{B}$ 상의 1권선밖에 전류를 흘리고 있지 않으므로 2권선 동시 여자에 비하여 토크는 반으로 감소되고, 진동이 생기기 쉬워서 실제로 사용되지는 않는다.

그러나 모터의 전원 회로를 포함시켜 회로 구성을 가장 간단히 할 수 있는 점에서 개념 설명에 널리 이용되고 있다. 그러면, 이하에 4상 모터에서의 유니폴러 구동에 있어서의 상 여자 순서(exciting sequence)에 대하여 알아보자. 4상 모터에는 1상 여자, 2상 여자, 1-2상 여자라고 하는 여자 순서가 있고, 이 방법의 선택에 따라 입력 펄스와 스텝 각의 특성이 달라진다.

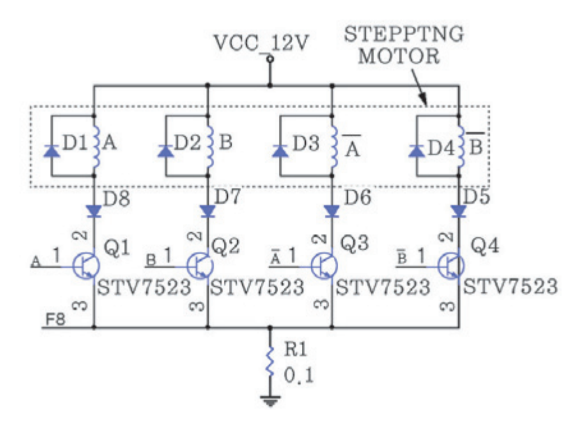


그림 Ⅴ-51 유니폴러의 구동 회로 예

(1) 4상 모터의 1상 여자 동작

그림 Ⅴ-52는 1상 여자 방식에서의 모터의 동작을 나타낸다. 그림 Ⅴ-51에서 트랜

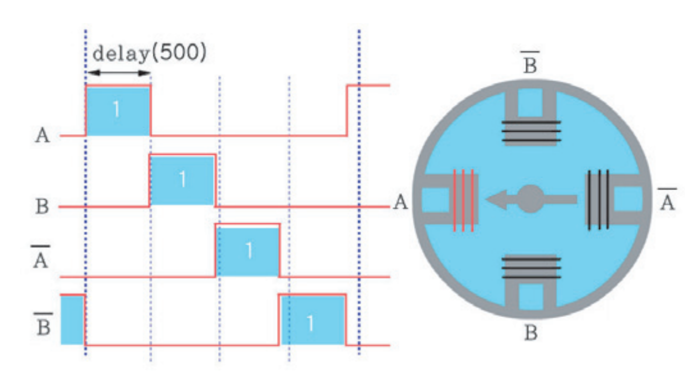


그림 Ⅴ-52 유니폴러 구동(1상 여자)

지스터 Q1이 ON이 되고, A 코일에 전류가 흐른다. 코일 $\overline{A}$에 전류가 흐름으로써 토크가 발생하여 회전자의 치(齒)는 1.8° 회전한다. 이어서 Q2가 ON 하여 코일 $\overline{B}$에 전류가 흐르면 다시 1.8° 회전하고, Q3가 ON 하여 코일에 전류가 흐르면 다시 1.8°회전하고, Q4가 ON 하여 코일에 전류가 흐르면 다시 1.8° 회전하게 된다. 이렇게 반복하면 반시계 방향으로 회전을 계속하게 된다.

즉, 코일 A → 코일 B → 코일 $\overline{A}$ → 코일 $\overline{B}$ → 다시 코일 A …… 순으로 전류를 흘려 주면(여자시켜 주면) 1.8°씩 계속 시계 반대 방향으로 회전하게 되며, 코일 상전류를 역순으로 여자시켜 주면 1.8°씩 계속 시계 방향으로 회전하게 된다. 이런 여자 방식을 동시에 1상씩 여자시켜 준다고 하여 1상 여자 방식이라고 한다.

(2) 4상 모터의 2상 여자 동작

그림 Ⅴ-53은 2상 여자 방식에서의 모터의 동작을 나타낸다. 그림 Ⅴ-51에서 트랜지스터 Q1과 Q4를 동시에 ON시키면 코일 A와 코일 $\overline{B}$에 동시에 전류가 흐른다. 코일 A, $\overline{B}$에 전류가 흐르게 되면 토크가 발생하여 회전자의 치(齒)를 1.8°회전시켜 준다.

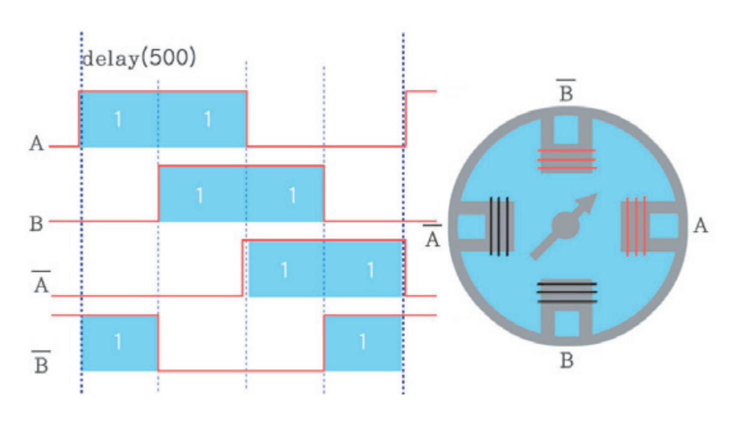


그림 Ⅴ-53 유니폴러 구동 (2상 여자)

이어서 Q1, Q2가 동시에 ON 하여 코일 A, B에 전류가 흐르면 다시 1.8° 회전하고, Q2, Q3가 ON 하여 코일 B, $\overline{A}$에 전류가 흐르면 다시 1.8° 회전하고, Q3, Q4가 ON 하여 $\overline{A}$, $\overline{B}$ 코일에 전류가 흐르면 다시 1.8° 회전하게 된다. 이렇게 반복하면 시계 반대 방향으로 회전을 계속하게 된다.

즉, 코일 A, $\overline{B}$ → 코일 A, B → 코일 B, $\overline{A}$ →코일 $\overline{A}$, $\overline{B}$ →코일 $\overline{B}$, A …… 순으로 전류를 흘려 주면(여자시켜 주면) 1.8°씩 계속 시계 반대 방향으로 회전하게 되며, 코일 상전류를 역순으로 여자시켜 주면 1.8°씩 계속 시계 방향으로 회전하게 된다. 이런 여자 방식을 동시에 2상씩 여자시켜 준다고 하여 2상 여자 방식이라고 한다.

(3) 4상 모터의 1-2상 여자 동작

그림 Ⅴ-54는 1-2상 여자 방식에서의 모터의 동작을 나타낸다. 그림 Ⅴ-51에서 트랜지스터 Q1과 Q4를 동시에 ON시키면 코일 A와 코일 $\overline{B}$에 동시에 전류가 흐른다.

코일 A, $\overline{B}$에 전류가 흐르게 되면 토크가 발생하여 회전자의 치(齒)를 1.8° 회전시켜 준다. 이어서, 트랜지스터 Q1이 ON이 되고, 코일 A에 전류가 흐른다. 코일 A에 전류가 흐름으로써 토크가 발생하여 회전자의 치(齒)는 1.8° 회전한다. 이어서 Q1, Q2가 동시에 ON 하여 코일 A, B에 전류가 흐르면 다시 1.8° 회전하고, 이어서 Q2가 ON 하여 코일 B에 전류가 흐르면 다시 1.8° 회전하고, Q2, Q3가 ON 하여 코일 B, $\overline{A}$에 전류가 흐르면 다시 1.8° 회전하고, 이어서 Q3가 ON 하여 코일 $\overline{A}$에 전류가 흐르면 다시 1.8° 회전하고, Q3, Q4가 ON 하여 코일 $\overline{A}$, $\overline{B}$에 전류가 흐르면 다시 1.8° 회전하게 되고, Q4가 ON 하여 코일 $\overline{B}$에 전류가 흐르면 다시 1.8° 회전하게 된다. 이렇게 반복하면 시계 반대 방향으로 회전을 계속하게 된다.

즉, 코일 A, $\overline{B}$ → 코일 A → 코일 A, B → 코일 B → 코일 B, $\overline{A}$ → 코일 $\overline{A}$ → 코

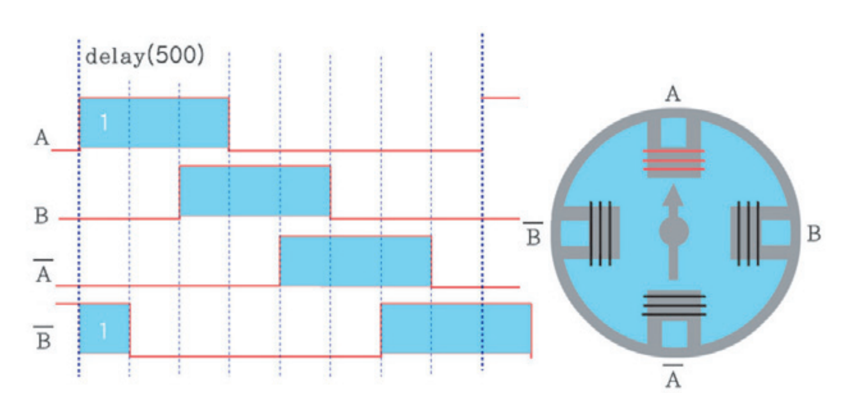


그림 Ⅴ-54 유니폴러 구동(1-2상 여자)

일 $\overline{A}$, $\overline{B}$ → 코일 $\overline{B}$, …… 순으로 전류를 흘려 주면(여자시켜 주면) 1.8°씩 계속 시계 반대 방향으로 회전하게 되며, 코일 상전류를 역순으로 여자시켜 주면 1.8°씩 계속 시계 방향으로 회전하게 된다. 이런 여자 방식을 1상 2상을 번갈아 여자시켜 준다고 하여 1−2상 여자 방식이라고 한다.

2. 바이폴러 구동

스테핑 모터의 구동으로는 전술한 것과 같은 간단한 구성으로 끝나는 유니폴러 구동 외에 회로는 복잡하여지지만 저속 영역에서의 토크를 개선할 수 있는 바이폴러 구동 방법이 있다.

그림 Ⅴ−55는 바이폴러 구동 회로의 대표적인 예를 보여 주고 있다. 이 바이폴러 구동은 모터의 코일에 교대로 전류를 흘리게 드라이브한다. 표 Ⅴ−6에 4상 스테핑 모터의 바이폴러 구동 시에 여자 방식에 따른 특성을 요약하여 본 것이다. 유니폴러 구동과 비교하여 2배수의 트랜지스터를 필요로 한다.

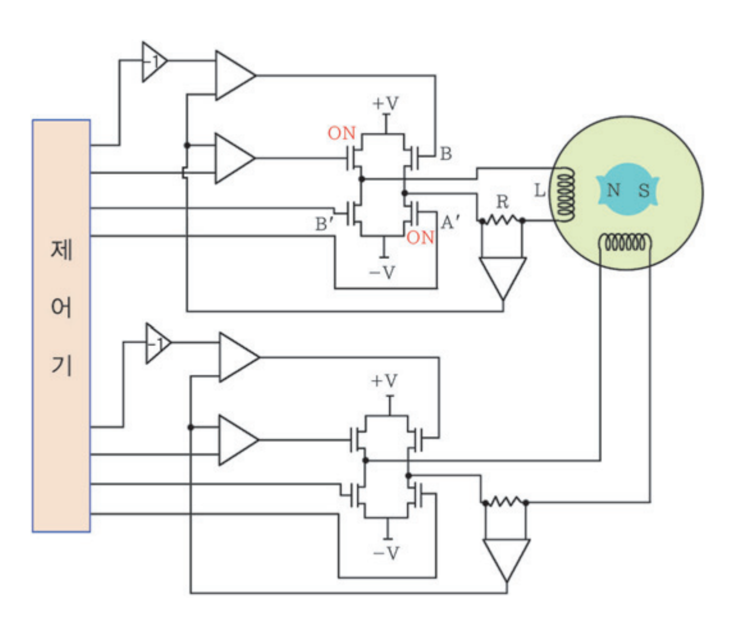


그림 Ⅴ−55 바이폴러 구동 회로

표 V-6 4상 스테핑 모터의 바이폴러 구동시 여자 방식에 따른 특성

구분	내용	스텝 각	입력	특성
바이폴러 1상 여자	항상 1조(2상)의 상에만 전류를 흘리는 방식(전류 방향은 교대로 변화한다).	θ (전스텝)	P	4상 권선의 2상(1상)만이 여자되는 방식으로 각도 정확도가 좋다. 전원이 작은 것으로 좋지만 두 가닥의 권선이 직렬로 접속되므로 두 배의 전압을 필요로 한다(바이폴러 드라이브의 공통의 특징). 다만, 전 코일의 1/2밖에 사용하고 있지 않으므로 이용 효율이 저하되어 바이폴러 드라이브에는 이용되지 않는다.
바이폴러 2상 여자	항상 2조의 상에 전류를 흘리는 방식(전류의 방향은 교대로 변화한다).	θ (전스텝)	2P	4상 권선의 모두가 여자되는 방식으로 덤핑 특성이 좋다. 유니폴러 드라이브에 비교하여 저속 시의 토크 특성이 우수하지만 고속이 되면 코일이 직렬로 접속되어 있기 때문에 L이 크고 시상 수가 길며, 반대로 토크가 낮아지는 결점도 있다. 코일의 이용률이 가장 높다.
바이폴러 1-2상 여자	1조의 상과 2조의 상을 교대로 전류를 흘리는 방식(전류 방향은 교대로 변화한다).	$\theta/2$ (반스텝)	1.5P	1조의 상과 2조의 상을 교대로 여자되는 방식으로 바이폴러 1상, 2상 여자의 중간 특징을 가지고 있다. 스텝 각은 1/2이 된다. 유니폴러 드라이브에 비교하여 복잡한 제어 회로를 필요로 한다.

5 스테핑 모터의 마이크로스텝 제어

최근에 스테핑 모터의 구동 방식으로 그림 V-56과 같은 마이크로스텝 구동 방식을 많이 채택하고 있다. 이것은 스테핑 모터의 기본 스텝 각을 세분화하여 $\frac{1}{n}$ 미세 각으로 제어를 하여 토크 리플이 적고 고속 제어, 저진동, 저소음으로 구동할 수 있게 하는 혁신적인 구동 방식이다.

마이크로스텝 구동 방식은 각 상의 권선에 흐르는 여자 전류를 정현파 형식으로 변화시켜 A상 권선에 cos파를, B상 권선에 sin파를 각각 인가한 후에 기본 스텝 각의 중간 영역에서도 위치 제어가 가능하게 구동하는 방식이다.

그림 V-56은 2상 모터의 $\frac{1}{8}$로 분할한 마이크로스텝 여자 방식에서 토크 벡터도를 나타낸 것이다. 마이크로스텝 구동 방식은 미소의 스텝 각을 얻을 수 있어 위치 정도를 향상시킬 수 있는 동시에, 각 여자 때의 합성 토크가 한상 여자시의 토크 값과 같게 여자 전류를 제어한다.

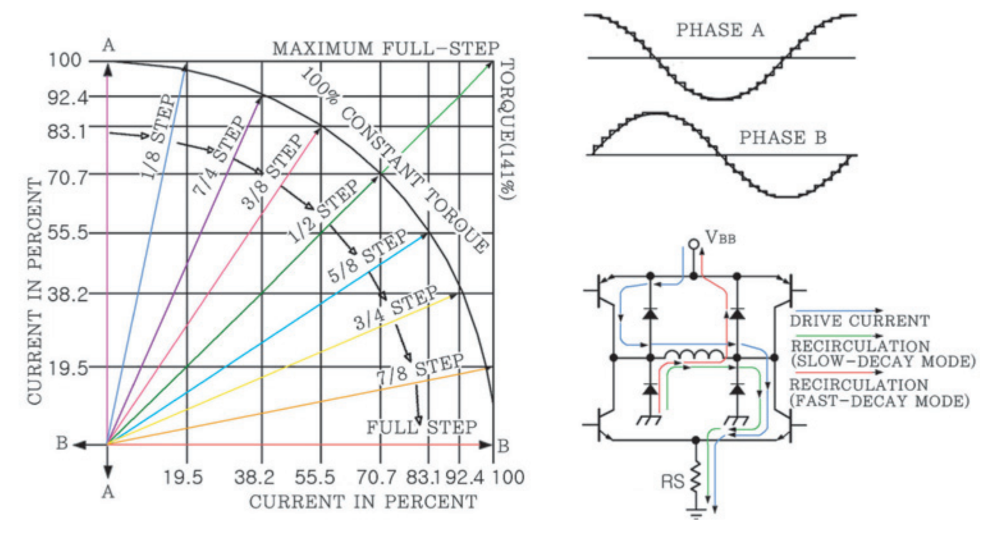


그림 Ⅴ-56 마이크로스텝 구동 상세 원리

이로부터 2상 권선의 여자 전류는 일반적으로 정전류 구동 방식을 사용하여 그림 Ⅴ-56과 같은 관계를 유지하면서 정현파로 제어할 수 있어 토크 특성이 좋아지고 고속화가 가능하며, 토크 리플이 적어 진동 소음을 줄일 수 있는 등의 많은 장점이 있으나, 가격이 고가인 단점이 있다.

그림 Ⅴ-57은 1스텝을 $\frac{1}{8}$로 분할시켜 조용하고 정밀한 마이크로스텝 구동을 가능하게 하며, 전력 손실이 매우 적기 때문에 발열이 매우 낮고 냉각 팬도 필요하지 않다. 칩의 온도는 쉽게 상승하지 않는다.

모터 코일은 온도 또는 전류가 한계를 초과할 때에 자동적으로 회로를 차단하고 한계 값 내의 범위일 때에 자동적으로 스위칭 동작이 되게 설계되어 있다.

각 상은 전류 피드백을 사용하여 항상 지령값 전류를 속도에 관계없이 일정하게 조절되게 설계되어 있다. 즉, 정전류 제어를 한다.

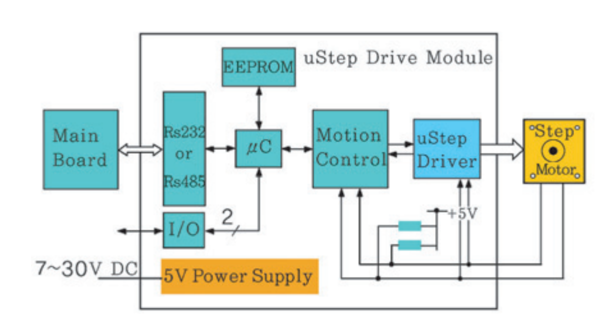


그림 Ⅴ-57 마이크로스텝 구동 회로 구성

실습 과제 3

스테핑 모터의 속도 제어

<도면>

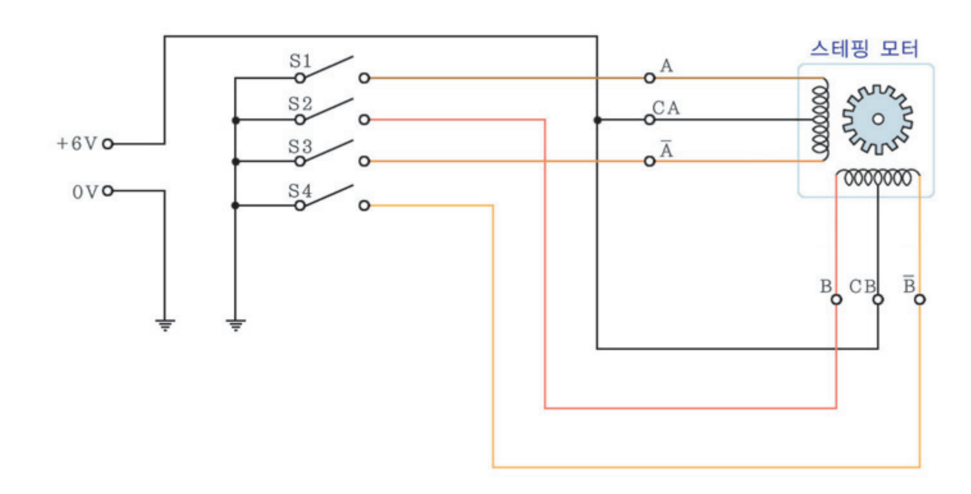


그림 Ⅴ-58 스테핑 모터의 속도 제어 회로

사용 재료와 기기

스테핑 모터(4 V 1.2 A 2상) 1대, 전선(배선용 전선) 10[m], 오실로스코프(2 현상 100 Mhz) 1대, 직류 전원(6 V, 2 A) 1대, 훅 미터(AC/DC 10 A 전류, R 측정) 1대, 공구 세트(배선에 필요한 공구) 1조, 타코미터(0~3500[rpm]) 1대

안전과 유의 사항

1. 회로 결선이 정확히 결선되었는지를 최종 확인한다.
2. 스테핑 모터 출력단이 단락되지 않도록 주의한다.

실습 순서

1. 관련 지식을 숙지 후에 도면대로 결선한다.
2. 스테핑 모터의 CA 단자와 CB 단자에 +6 V 전원에 연결한다.
3. 스테핑 모터의 A 단자를 S_1에, $\overline{A}$ 단자를 S_3에, B 단자를 S_2에, $\overline{B}$ 단자를 S_4에 결선한다.
4. 스테핑 모터의 회전 방향을 도면의 $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4$ 순으로 눌러 회전 여부를 확인한다.

5. S_4 → S_3 → S_2 → S_1 순으로 역으로 눌러 회전 방향이 반대 방향으로 바뀌며 회전하는지를 확인한다.
6. S_1～S_4까지 누르는 속도를 빠르게 하며 회전 속도가 빨라지는지를 확인한다.
7. 전원 +6 V를 너무 높은 전압으로 잘못 연결하면 스테핑 모터가 가열되어 소손될 수가 있으므로 주의한다.

결과 정리

1. 그림 Ⅴ－58은 스테핑 모터의 속도 제어 회로를 보여 주고 있다. 이 회로의 동작을 서로 토론한다.
2. 각 부의 파형을 오실로스코프로 관찰한다.
3. 회로 동작을 이해하기 위하여 각 스위치(S_1～S_4)의 순서를 바꾸어 가며 파형을 관찰하고 각 여자 방식을 이해한다.
4. 본문 214～216쪽을 참조하여 2상 여자, 1－2상 여자 방식을 조사하고, 이때 S_1～S_4의 스위칭 순서를 기록하고, 그 순서대로 ON시켜 원리대로 회전하는지를 확인한다. (그림 Ⅴ－53, Ⅴ－54 참조)